



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA ČEPU

PRODUCTION OF COUPLING PIN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Pátek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Martin Pátek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Kamil Podaný, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výroba čepu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o návrh technologie výroby čepu. Součástka je válcového tvaru a bude vyráběna technologií protlačování. Na tuto problematiku bude také zaměřena literární studie.

Cíle bakalářské práce:

- zhodnotit technologičnost čepu,
- provést rozbor možných technologií výroby se zhodnocením jejich vhodnosti a nevhodnosti,
- vypracovat aktuální literární studii se zaměřením na zvolenou technologii,
- zpracovat návrh výroby doložený nezbytnými technologickými a kontrolními výpočty,
- navrhnout a popsat tvářecí nástroj,
- zhotovit výkres nástroje a kusovník,
- provést technicko–ekonomické hodnocení.

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, Milan. Teorie tváření a nástroje. 1. vyd. Nakladatelství VUT v Brně. Brno: Rekrorát Vysokého učení technického v Brně, 1991. 187 s. ISBN 80-214-0294-6.

SAMEK, Radko, Eva ŠMEHLÍKOVÁ a Zdeněk LIDMILA. Speciální technologie tváření. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010-2011, 2 sv. (134, 155 s.). ISBN 978-80-214-4406-52.

HOSFORD, William F. a Robert M. CADDEL. Metal Forming: Mechanics and Metalurgy. 3th ed. New York: Cambridge University Press, 2007. 365 s. ISBN 978-0-521-88121-0.

FELDMANN, Heinz D. Protlačování oceli: určeno pro technology a konstruktéry. 1. vyd. Praha: SNTL, 1962, 197 s.

MARCINIAK, Zdislaw, John L. DUNCAN a Jack S. HU. Mechanics of Sheet Metal Forming. 2.ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 211 s. ISBN 07-506-5300-00.

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno: CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.

NOVOTNÝ, Karel. Tvářecí nástroje. 1. vyd. Brno: Nakladatelství VUT v Brně, 1992. 186 s. ISBN 80-214-0401-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

PÁTEK Martin: Výroba čepu

V této práci byl navržen technologický postup výroby protlačku. Jako materiál byla zvolena nízkolegovaná, konstrukční ocel 27MnCrB7-2. Z rozboru vhodných metod výroby byla vybrána technologie protlačování, na níž byla zaměřena teoretická i praktická část práce. Byla navržena výroba ve třech operacích, které byly ještě rozděleny do dvou kroků kvůli vyčerpání plastických vlastností materiálu. Před oběma kroky bylo provedeno tepelné zpracování a povrchová úprava. Pro všechny operace byl navržen speciální nástroj, pouze upínací tělesa jsou univerzální. První krok bude realizován na hydraulickém automatu Schüller p200 s nominální silou 20 000 kN a druhý krok na klikovém lisu Krupp p63 s nominální silou 6 300 kN. Pro průtlačníky i průtlačnice byl zvolen materiál 19 436 s následným tepelným zpracováním dle výkresové dokumentace. Celkové náklady na celou sérii byly stanoveny na 17 733 870 Kč. S 30% marží se tyto náklady vynulují při 43 945 vyrobených kusech a dále je série pouze zisková.

Klíčová slova: Ocel 27MnCrB7-2, čep, protlačování, simulace, povrchová úprava

ABSTRACT

PÁTEK Martin: Production of coupling pin

In this thesis there was designed a technological procedure of production of the coupling pin. As a material was selected low alloyed, construction steel 27MnCrB7-2. From the analysis of suitable methods was selected bulk forming technology, on which is focused theoretical and practical part of the thesis. There was designed the production in three forming operations, which were also divided to two steps because of enervation of plastic properties. Before both steps, there was done heat and surface treatment. For all operations there was designed a special tool, only the clamping parts are universal. The first step will be implemented on hydraulic press Schüller p200 with nominal force 20 000 kN and the second one on mechanical press Krupp p63 with nominal force 6 300 kN. For extruding dies and punches was selected material 19 436 with subsequent heat treatment by the technical documentation. Overall costs of the whole batch are 17 733 870 Kč. With 30% margin these costs are deleted by the 43 945 finished pieces and after this it is only profitable.

Keywords: Steel 27MnCrB7-2, coupling pin, bulk forming, simulations, surface treatment

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PÁTEK, Martin. *Výroba čepu*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116698>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Kamil Podaný.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

Na Hlíně dne 24. 5. 2019

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Kamilovi Podanému, PhD. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále děkuji panu Ing. Petru Šerákovi a celé firmě Metaldyne Oslavany za poskytnutí zadání, zázemí a podpory během jejího zpracování. Na závěr bych chtěl poděkovat paní Bc. Lence Pátkové, mojí mamince, za víru, podporu a připomínky nejen během tvorby práce, ale i celého studia.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ	10
1.1 Alternativy výroby	11
2 TECHNOLOGIE PROTlačOVÁNÍ	13
2.1 Dopředné protlačování	14
2.2 Zpětné protlačování	15
2.3 Vhodné oceli	16
2.4 Příprava polotovaru	17
2.5 Protlačovací nástroje	20
2.5.1 Průtlačníky	21
2.5.2 Průtlačnice	22
2.6 Stroje pro protlačování	23
2.6.1 Klikové lisy	23
2.6.2 Hydraulické lisy	23
2.7 Technologičnost	24
3 NÁVRH VÝROBY	25
3.1 Polotovar	25
3.2 Technologický postup	26
3.3 Výpočty přetvoření, sil a prací	29
3.4 Návrh nástroje	32
3.5 Volba stroje	36
4 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	37
5 ZÁVĚRY	40
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	
Seznam výkresů	

ÚVOD [1], [3], [5], [7]

Sériová výroba součástí byla vždy základním kamenem moderního strojírenství, kde byla potřeba vyrábět velké množství dílů podobných tvarů a velikostí pro následné montáže hotových výrobků. Čím byly vyšší požadavky zákazníka, tím rychleji se muselo vyrábět. Nejjednodušší metodou bylo odlévání či třískové obrábění, ale tyto metody, ačkoli jsou zcela nezbytné pro celé strojírenství, nebyly schopny udržet krok s dnešními vysokými požadavky na počet výrobků. Na tomto základě se pro hromadnou a velkosériovou výrobu začalo do popředí dostávat objemové tváření. To umožňuje ušetřit velké objemy materiálu. Vyrábět lze pod i nad teplotou rekrytalizace.

Při výrobě protlačováním není úspora materiálu jedinou výhodou. Velmi pozitivní jsou i vysoké mechanické vlastnosti v důsledku zpevnění či struktura povrchu. Další kladnou vlastností jsou krátké výrobní časy, což umožňuje rychlejší výrobu velkých sérií, která je pro zákazníka zcela prioritní. V neposlední řadě je pozitivem i dosahovaná přesnost součástí, jež se pohybuje v rozmezí IT 6 až IT 9. Výroba je vhodná především pro rotační součásti, jako jsou různé šrouby, čepy, nýty, hřídele nebo matice, ale v současné době lze vyrábět protlačky různých tvarů a velikostí viz obrázek 1. Výhodou je i velice snadná automatizace, což umožňuje ještě dramatičtější zkrácení výrobních časů.



Obr. 1 Příklady výrobků vyráběných protlačováním [7]

1.1 Alternativy výroby [1], [2], [3], [5], [9], [10], [11], [15]

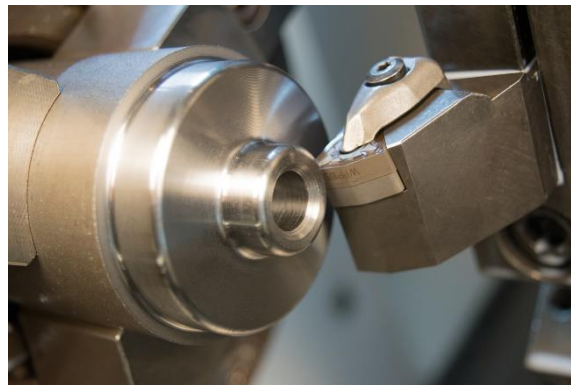
Pro zadanou součást lze použít několik rozdílných technologií výroby. Je nezbytné brát v potaz technologičnost, požadavky na tvarovou i rozměrovou přesnost, velikost série, rychlost výroby, zpracováváný materiál a požadované mechanické vlastnosti. Lze uvažovat o výrobě těmito metodami:

- Odlévání (obr. 4) – princip metody spočívá v ohřátí kovu nad tavicí teplotu a jeho následné odlití do formy. Při lití do písku se dosahuje přesnosti IT 10, při technologii přesného lití lze dosáhnout až stupně IT 6. Výrobky mají po odlití dendritickou nerovnoměrnou strukturu, která má nízké mechanické vlastnosti. Další nevýhodou jsou přidružené operace k procesu, jako je ohřev, výroba modelu, vyjmutí součástí z forem a delší ochlazovací časy. Technologie odlévání se může (např. při lití do písku) vyznačovat velmi vysokou drsností povrchu, jež může zvýšit náklady na obráběcí nástroje při dokončování. Nežádoucí je rovněž ztráta materiálu v podobě vtokové soustavy, nálitků či úkosů. Vady spojené s odléváním, jako jsou póry, staženiny, řediny či trhliny uvnitř výrobku jsou rovněž nepřijatelné, protože značně snižují životnost a mechanické vlastnosti součástí. Bylo by tedy nutné provést kontrolu každého dílce, nejlépe rentgenem, který odhalí nejvyšší procento vad, ale náklady na výrobu by se tímto značně zvýšily. Zvolený materiál lze bez problémů odlévat, nicméně byla tato technologie vyhodnocena jako nevhodná pro tuto konkrétní součást.



Obr. 4 Odlévání [9]

- Soustružení (obr. 5) – základem metody je vnik řezné hrany nástroje do materiálu, od kterého je následně oddělena tříska. Pomocí této technologie je možné vyrábět součásti ve velmi vysokých třídách přesnosti – až IT 5, včetně kvalitní struktury povrchu. Používá se proto nejčastěji pro dokončovací operace. Nevýhodou jsou však delší strojní časy, vysoká spotřeba materiálu (značné procento odpadu) a nižší mechanické vlastnosti, kvůli narušení průběhu vláken. Na všechny obráběné plochy je nutné zvolit vhodné přídavky, které však zvyšují spotřebu materiálu. Nutnost chlazení řezného procesu kapalinou je zcela zásadní pro zvýšení životnosti obráběcích nástrojů, a dokonce i podmínkou obrobitelnosti pro některé materiály, ale výrazně zvyšuje provozní náklady. Zadaný materiál 27MnCrB7-2 je ve vyžádaném stavu velice dobře obrobitelný, protože obsahuje globulární perlit, jehož vrubový účinek je značně nižší, než je tomu u perlitu lamelárního.



Obr. 5 Soustružení [10]

- Zápustkové kování (obr. 6) – jedná se o tváření nad teplotou rekrystalizace, což výrazně snižuje deformační odpor při procesu. Polotovar, ohřátý na kovací teplotu, se umístí do zápustky a působením energie bucharu či síly lisu je přetvořen na požadovaný tvar. Je možné zhotovit součásti téměř všech tvarů, velikostí a z velmi široké škály materiálů. Přesnost výkovků se pohybuje v rozmezí IT 11 až IT 14. Kování má rovněž pozitivní vliv na mikrostrukturu materiálu v podobě zjemnění zrna a na makrostrukturu materiálu, kde vlákna kopírují tvar součásti, z čehož plynou vyšší mechanické vlastnosti výrobku. Nevýhoda spočívá v někdy obtížné volbě dělicí roviny, ztrát materiálu v podobě úkosů, jež jsou nezbytné pro vyjmutí výkovků ze zápustek, a ztrát ohřevem na kovací teploty. Kováním je rovněž velmi obtížné zhotovit dlouhá dutá tělesa či úzké, hluboké dutiny.



Obr. 6 Zápustkové kování [11]
- Protlačování (obr. 7) – je tváření pod teplotou rekrystalizace, zpravidla do 250 °C. Polotovar o pokojové teplotě je vložen do průtláčnice a následným silovým působením přetvořen do požadovaného tvaru. Tato metoda se vyznačuje nejvyšší úsporou materiálu, protože zde nejsou potřeba úkosy a přídavky na ohřev jako u kování nebo vtoková soustava či nálitky u odlévání. Díky deformačnímu zpevnění během a po tvářecím procesu dosahují mechanické vlastnosti výrobků vysokých hodnot. Lze vyrábět ve vysokých třídách přesnosti – až IT 6, je zde velmi snadná automatizace, protože naprostá většina lisů je vybavena vyhazovači, takže má i nejkratší výrobní časy. Drobnou nevýhodou jsou přidružené operace v podobě žíhání pro obnovu plastických vlastností či aplikace maziva před tvářením, jež je pro celý proces zcela zásadní, protože dochází k velkému tření mezi nástroji a materiálem.



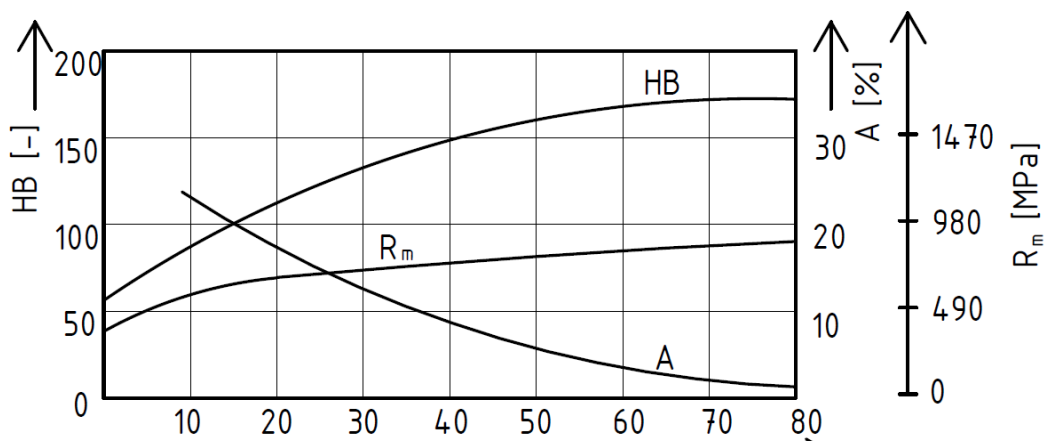
Obr. 7 Protlačování [vl. tvorba]

Vzhledem k velikosti série 200 000 ks / rok, úspoře materiálu, technologičnosti a třídě přesnosti jeví jako nejvýhodnější technologie objemového tváření za studena, tedy protlačování. Touto technologií je možné zpracovávat velké série v poměrně krátkém čase, vysoké přesnosti a s nízkým nebo nulovým procentem odpadu a na ni bude zaměřena teoretická i praktická část práce.

2 TECHNOLOGIE PROTlačOVÁNÍ [2], [3], [5]

Protlačování je založeno na principu vytvoření stavu trojosé tlakové napjatosti působením síly. To vede k vytvoření výrazné plastické deformace materiálu, aniž by v něm vznikaly trhliny. Tvar finálního výrobku je dán rozměry průtláčnicku a průtláčnice. Jedná se o objemové tváření za studena, což znamená, že se tváří výrazně pod teplotou rekrystalizace, a to s sebou nese výhody i nevýhody. Metoda je vhodná především pro výrobu velkých sérii, kvůli vysokým požadavkům na kvalitu nástrojů a jejich vysokou cenu.

Mezi největší výhody technologie patří především úspora materiálu, která může být oproti třískovému obrábění až 95 %. Dále přináší zvýšené hodnoty původních mechanických vlastností kvůli principu deformačního zpevnění a také kvůli tomu, že není narušen průběh vláken v materiálu. Díky zpevnění dochází však i ke snížení tažnosti, a plastických vlastností. Tyto změny jsou graficky zobrazeny na obrázku 8. Pro další operace je nutné provést jejich obnovu, což je řešeno zavedením mezioperačního žíhání. Dalším drobným úskalím je velmi vysoké tření mezi výrobkem a nástroji, proto musí být polotovary opatřeny vrstvou maziva.



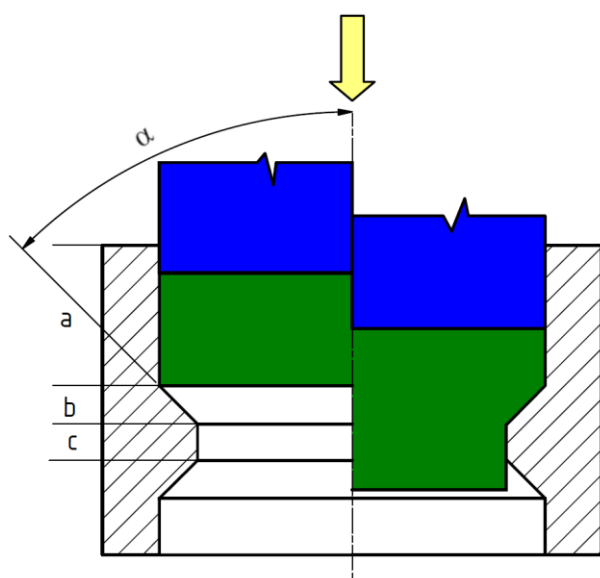
Obr. 8 Změny mechanických vlastností [2]8

Materiálové vlastnosti se zjišťují pomocí přechovacích zkoušek, ze kterých je určeno, nejvyšší možné zatížení, aniž by došlo k jeho porušení. Každá ocel má tyto křivky jiné. Při začátku procesu je nejvhodnější materiál, jež se nachází ve stavu, který odpovídá mezi kluzu. Konec procesu by měl nastat před dosažením meze pevnosti, aby se neporušil. Každá ocel má maximální hodnotu přetvoření, při jejímž dosažení už není možné materiál dále tvářet a musí dojít k obnově plastických vlastností, nejčastěji tepelným zpracováním. Pokud je pro výrobu dané součásti potřeba větší redukce, je nutno proces rozložit do více operací tak, aby byl deformační odpor co nejmenší, což má i pozitivní vliv na zvýšení životnosti nástrojů.

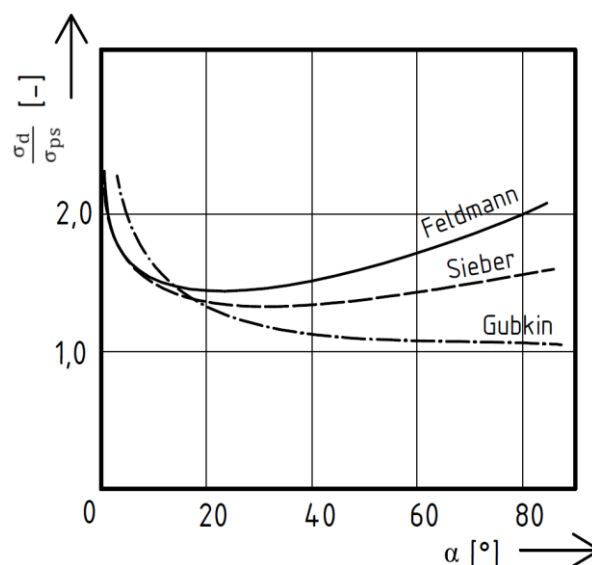
Výrobu lze rovněž velmi dobře automatizovat, což vede k velmi krátkým výrobním časům a výraznému zvýšení produktivity. Lze dosáhnout kvalitní tvarové i rozměrové přesnosti protlačovaných dílců, a to až v tolerančním stupni IT 6. Drsnost povrchu se pohybuje nejčastěji v rozmezí Ra 0,8 až 1,6 μm .

2.1 Dopředné protlačování [1], [2], [4], [5]

Při dopředném protlačování teče materiál ve směru shodným s pracovním směrem pohybu průtlačníku. Metoda je založena na průchodu vstupního materiálu, jež je uložen v zásobníku (obr. 9a), redukční části nástroje. Ta se skládá z části průtlačnice, jež je kuželová (obr. 9b) a z kalibračního očka (obr. 9c). Úhel kuželové části α (obr. 9) je pro proces naprosto zásadní, protože bylo matematicky i empiricky dokázáno, že má přímý vliv na velikost deformačního odporu, tato závislost je graficky zobrazena na obrázku 10. Graf byl sestaven pro ocel 12 121 1R a jsou v něm znázorněny tři různé matematické modely – dle Feldmanna, Siebera a Gubkina. Je z něj rovněž patrné, že nejnížší hodnoty deformačního odporu lze dosáhnout při redukčních úhlech o velikosti 15 až 30 °, pokud je správně nastaveno mazání. V technické praxi se pro výpočty nejčastěji používá Feldmannův model.



Obr. 9 Schéma dopředného protlačování [1]



Obr. 10 Závislost poměrného deformačního odporu na úhlu α [1]

Křivku pro velikost deformačního odporu dle Feldmanna lze matematicky popsat následujícím vztahem:

$$\sigma_{dF} = \sigma_{PS} \left[\left(1 + \frac{f_2}{\alpha} \right) \cdot \ln \left(\frac{D_0^2}{D_1^2} \right) + \frac{2}{3} \cdot \alpha \right] + 4 \cdot f_2 \cdot \frac{D_1 \cdot L_1}{D_0^2} \cdot \sigma_{PS} + 4 \cdot f_1 \cdot \frac{L_0}{D_0} \cdot \sigma_{P1} \quad (2.1)$$

kde: σ_{dF} – deformační odpor dle Feldmanna [MPa]

σ_{PS} – střední hodnota přirozeného přetvárného odporu [MPa]

f_1 – koeficient tření v zásobníku [-]

f_2 – koeficient tření v kuželové části [-]

α – úhel kuželové části [rad]

L_1 – výška polotovaru v zásobníku [mm]

L_3 – výška kalibračního očka [mm]

σ_{P1} – přirozený přetvárný odpor v zásobníku [MPa]

D_0 – průměr polotovaru [mm]

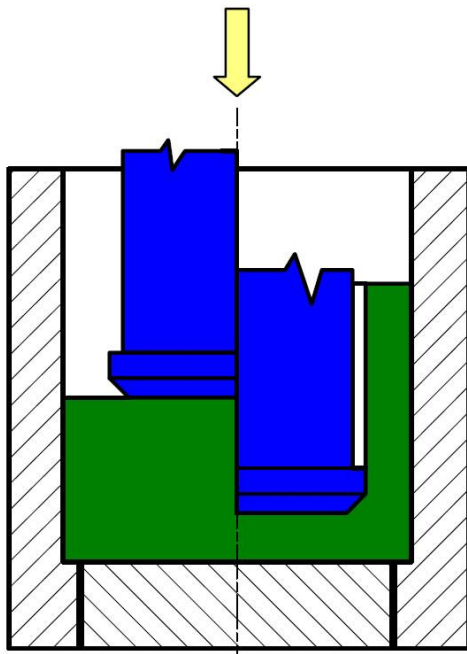
D_{1d} – požadovaný průměr dříku [mm]

Tato technologie je naprosto zásadní pro výrobu spojovacích součástí, ale velmi často se používá i k redukci průměru tyčí, trubek, kalíšků nebo k vytvoření různých profilů. Touto metodou lze dosáhnout poměrné deformace až 90 %, závisle především na kvalitě vstupního materiálu, mazání a geometrii nástroje. Poměr délky a průměru protlačku zde může být až 24 : 1, je to dáno tím, že délka protlačku není závislá na délce nástroje.

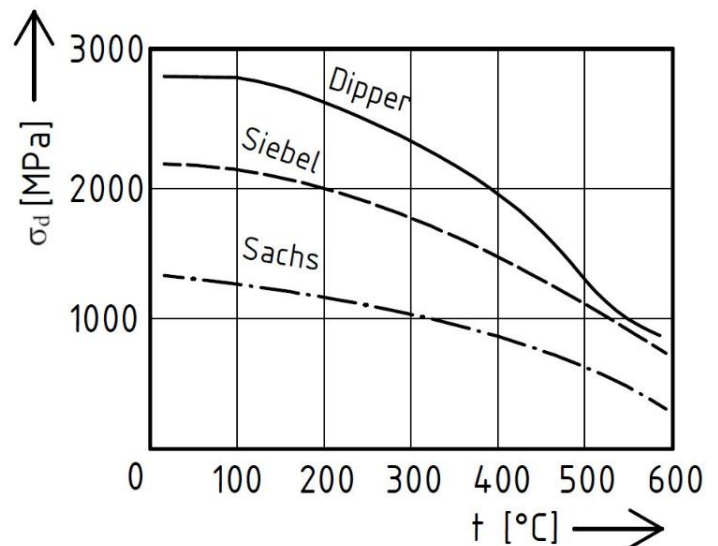
2.2 Zpětné protlačování [1], [2], [4], [5], [6]

Při zpětném protlačování teče materiál zcela opačným směrem, než je tomu u dopředného protlačování, tedy proti směru pracovního pohybu průtlačníku. Princip metody spočívá v uložení polotovaru do průtlačnice a působením síly průtlačníku materiál vytéká ven mezikružím, které je dané průtlačníkem a průtlačnicí, nakonec je vyhazovačem odstraněn z pracovního prostoru. Schéma principu je na obrázku 11.

Je empiricky dokázáno, že deformační odpory při zpětném protlačování jsou obecně vyšší než hodnoty při protlačování dopředném. Hodnota této veličiny klesá s rostoucí teplotou. Avšak při vyšších teplotách klesá také přesnost součástí a kvalita povrchu. Zvyšují se rovněž náklady na výrobu z důvodu použití pecí pro ohřev. Vztah mezi teplotou polotovaru při tváření a deformačním odporem je graficky vyjádřen na obrázku 12. Jsou zde zobrazena tři základní matematická řešení, dle Dippera, Siebela a Sachse. Graf byl sestaven pro ocel 14 109.3 a je z něj patrné, že s rostoucí teplotou odpor klesá.



Obr. 11 Schéma zpětného protlačování [1]



Obr. 12 Graf závislosti deformačního odporu na teplotě [4]

Matematicky lze Siebelovo řešení popsat následujícím vztahem:

$$\sigma_{ds} = 1,152 \cdot \sigma_p \cdot \frac{D_0^2}{d^2} \cdot \left(\log \frac{D_0^2}{D_0^2 - d^2} + \frac{D_0^2}{D_0^2 - d^2} \cdot \log \frac{D_0^2}{d^2} + \log \frac{d^2}{D_0^2 - d^2} \right) \quad (2.2)$$

kde: σ_{ds} – deformační odpor dle Siebela [MPa]

σ_p – přirozený přetvárný odpor [MPa]

d – průměr otvoru v součásti [mm]

Nejčastěji se používá pro výrobu kalíškovitých součástí. Výrobky mohou mít různé tvarované dno nebo tloušťku stěny. Tento způsob tváření se vyznačuje vysokým deformačním odporem, což vede k několika omezením při konstrukci nástrojů. Maximální používaná redukce pro nízkouhlíkové oceli je 65 %, při vyšších redukcích dochází k výraznému snížení životnosti nástrojů. Jako polotovar se nejčastěji používá špalík, ale lze použít i svařované prstence či jiné.

2.3 Vhodné oceli [2], [3], [5], [13], [15], [16]

Teoreticky lze tvrdit, že je možné tvářením za studena zpracovávat všechny oceli. V praxi je však tento výběr omezen nástrojovými materiály, které snesou jen určitou hodnotu zatížení. Materiály nástrojů jsou často z vysokolegovaných ocelí, jejichž cena je poměrně vysoká, proto je snaha o protlačování takových materiálů, aby jejich životnost a produktivita byly co nejvyšší. Nejvhodnější jsou proto oceli s nízkou mezí kluzu, vysokou tvárností a nízkým sklonem ke zpevnění. V průmyslu se tyto vlastnosti určují pomocí pýchovacích zkoušek. Z výsledků plyne, že materiál nesmí být v křehkém stavu, jinak dojde téměř ihned ke vzniku trhlin. Naopak oceli s vysokou houževnatostí jsou pro tvářením za studena velmi vhodné. Při volbě materiálu je nutné brát v úvahu deformační zpevnění, jež zvyšuje mechanické vlastnosti protlačků. Dají se tak snížit náklady na výrobu pořízením materiálu o nižší jakosti, jež bude mít v hotovém stavu stejné vlastnosti.

Oceli pro protlačování je možno rozdělit do tří základních skupin, podle jejich deformačního odporu. Jsou to oceli s nízkým (např. 11 523), středním (např. 13 240) a velkým deformačním odporem (např. 16 220) – do této skupiny také spadá zadaný materiál 27MnCrB7-2. Některé oceli vhodné k protlačování a jejich chemické složení je popsáno v příloze 1. Množství a výskyt různých prvků má mimo jiných činitelů nezanedbatelný vliv na tvařitelnost. Některé prvky ji zvyšují, další naopak snižují. Jiné prvky na ni zase nemají přímý vliv, ale přidávají se do ocelí například kvůli budoucímu tepelnému zpracování nebo kvůli funkci dílce.

Zásadní vliv na vlastnosti ocelí má uhlík, jež se nachází v krystalové mřížce, jako intersticiální atom. Se železem tvoří karbid železa, jež značně zvyšuje pevnost materiálu. Je tedy logické, že s rostoucím obsahem uhlíku budou klesat plastické vlastnosti. Nejlépe tvárné jsou oceli s obsahem uhlíku pod 0,25 %, se stoupajícím množstvím uhlíku je nutné před tvářením tepelné zpracování, které přemění lamelární perlit na globulární, lépe tvárný. Nejhuře jsou tvařitelné oceli s množstvím uhlíku vyšším než 0,45 %. Oceli s vyšším procentem uhlíku, než je tato hranice, je nutno předehřívát.

Dalším velmi významným prvkem v ocelích je křemík. Používá se často v ocelárnách jako dezoxidační prvek. Pokud je dezoxidace provedena pouze křemíkem, je jeho množství až 0,35 %, což je horní hranice tvařitelnosti. Nad touto hodnotou se ocel dostává do takového stavu křehkosti, že ji není možno protlačovat. S rostoucím množstvím křemíku se zvyšují mechanické vlastnosti, ale rovněž i počet vměstků.

Mangan patří mezi nejvýznamnější prvky, protože je velmi často využíván už v ocelárnách při přípravě ocelí, jako odsířovací a dezoxidační prvek. Zvyšuje mechanické vlastnosti, ale nemá příliš velký vliv na tažnost, proto lze oceli i s 1,5 % manganu velmi dobře protlačovat a jejich mechanické vlastnosti dosahují vysokých hodnot.

Jako nečistota a zcela nežádoucí prvek je chápána síra. Její sloučeniny s železem a manganem tvoří vměstky, které snižují tvařitelnost. Ocel by neměla obsahovat více než 0,04 % síry, při překročení této hranice výrazně klesá houževnatost.

Fosfor je stejně jako síra nežádoucím prvkem, jež způsobuje pokles houževnatosti. Stejně jako síry by jej ocel neměla obsahovat více než 0,04 %.

Chrom značně zvyšuje mechanické vlastnosti ocelí, především tvrdost. Jeho přítomnost zvyšuje ořezuvzdornost, pevnost za tepla a odolnost proti korozi. Je to základní legující prvek všech legovaných ocelí. Rovněž značně zvyšuje prokalitelnost.

Bor i při velmi nízké koncentraci (tisíciny procenta) silně zvyšuje její prokalitelnost.

Jako nežádoucí prvky jsou obecně považovány všechny plyny, především kyslík, dusík a vodík. Tyto prvky v oceli tvoří sloučeniny se železem a ostatními legurami, což vede ke tvorbě vměstků a tím se snižuje její kvalita. Tyto prvky mohou rovněž tvořit bubliny v materiálu, což opět vede k jeho znehodnocení. Množství těchto prvků nesmí být více než 0,1 %.

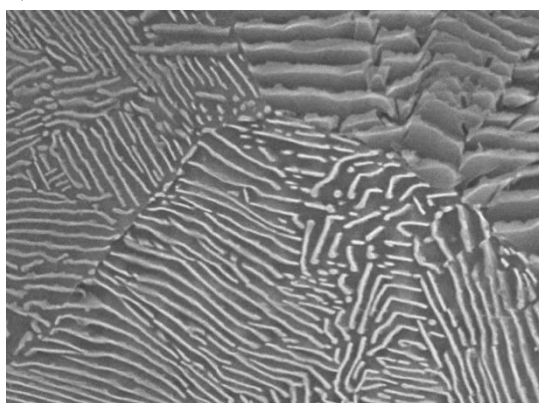
2.4 Příprava polotovaru [5], [12], [13], [14], [15], [16], [17]

Během procesů protlačování za studena dochází v materiálu ke zpevňování, což má za následek vyšší mechanické vlastnosti, ale zároveň dochází k výraznému poklesu tažnosti a tím i tvařitelnosti. Pokud jsou redukce příliš vysoké, hodnota zpevnění dosáhne kritické úrovně, a výroba se musí rozčlenit do více operací, mezi které je zařazena obnova tvárných vlastností. Ta se nejčastěji provádí pomocí žihání, jež se dělí na žihání s překrystalizací nebo bez ní. Společné mají to, že změny teploty probíhají velmi pomalu, čímž je dosaženo téměř homogenní struktury. Žihání je zaměřeno na změny uspořádání stávajících fází nebo na jejich přeměnu.

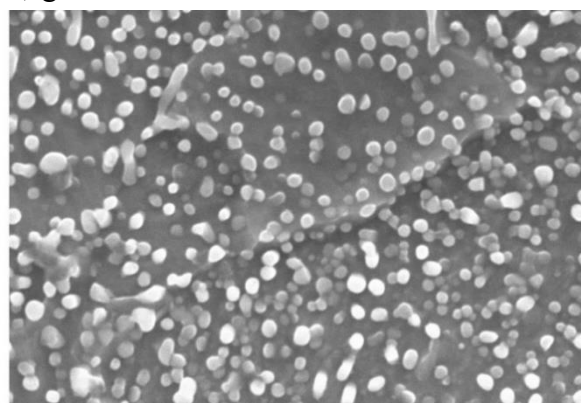
Jak napovídá název, žihání bez překrystalizace probíhá pod teplotou A_{c1} , proto jsou tyto procesy časově velmi náročné. Do této kategorie se řadí žihání na měkko, žihání rekrystalizační a žihání na odstranění zbytkových napětí. Všechny tyto žihací metody zvyšují tvařitelnost i obrobitelnost dané součásti.

Žihání na měkko je především určené ke sferoidizaci cementitu, čímž se lamelární perlit (obr. 13a) mění na globulární (obr. 13b). To s sebou nese výrazné zvýšení tvárnosti a obrobitelnosti. Žihání na měkko je u podeutektoidních ocelí prováděno při teplotě $620 - 680\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu $4 - 8$ hodin. Pro oceli s vyšším množstvím doprovodných či legujících prvků je toto žihání prováděno na teplotě o něco vyšší než A_{c1} .

a) lamelární

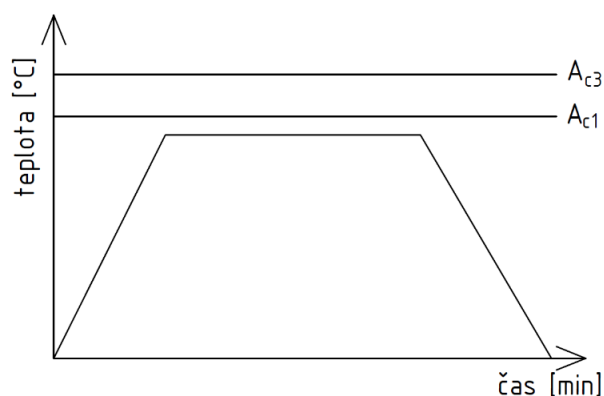


b) globulární

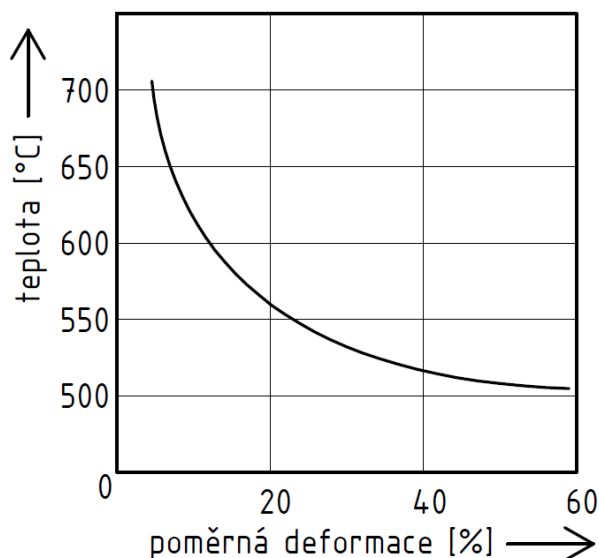


Obr. 13 Struktura perlitu pod elektronovým mikroskopem ($15\,000\times$ zvětšeno) [17]

Žihání rekrystalizační bývá nejčastěji zařazeno jako mezioperační proces při tváření ocelí za studena. Nejen, že velmi dobře odstraňuje deformační zpevnění, ale lze dosáhnout i zhrubnutí či zjemnění zrn. Princip spočívá v ohřevu součástí na teplotu rekrystalizace, jež je těsně pod A_{c1} , nesmí však dojít k jejímu překročení, jinak dojde k překrystalizaci. Teplota rekrystalizace se rovněž volí podle stupně deformace dané součásti. Závislost teploty žihání na čase je pak na obrázku 14. Čím je deformace vyšší, tím nižší teplota musí být nastavena, viz obrázek 15.



Obr. 14 Závislost teploty žihání na čase [12]



Obr. 15 Závislost teploty žíhání na poměrné deformaci [5]

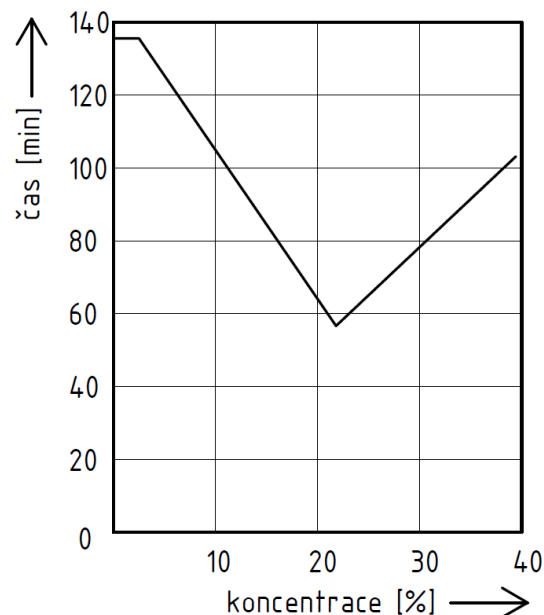
protlačovacích nástrojů. V další fázi následuje odstranění vodou nesmáčených nečistot, především různých tuků a maziv. Probíhá v odmašťovacích komorách, kde jsou polotovary oplachovány buď solnými nebo organickými roztoky. Je potřeba pečlivě volit složení a teplotu lázně, protože při nesprávně nastavených podmínkách může dojít ke znehodnocení celého procesu a zvýšení nákladu na následné zpracování.

V poslední fázi dochází k odstranění chemicky vázaných nečistot, jako jsou okuje či koroze. To se provádí mořením v kyselém prostředí, nejčastěji v roztoku kyseliny sírové. Roztok proniká póry a trhlinami mezi vrstvy okují a rozpouští je. Při tomto procesu vzniká vodík, který tomuto procesu mírně napomáhá. Koncentrace kyseliny se volí v rozsahu 20 – 30 %, z důvodu urychlení mořicích časů. Graf závislosti času moření na koncentraci kyseliny sírové je na obrázku 16.

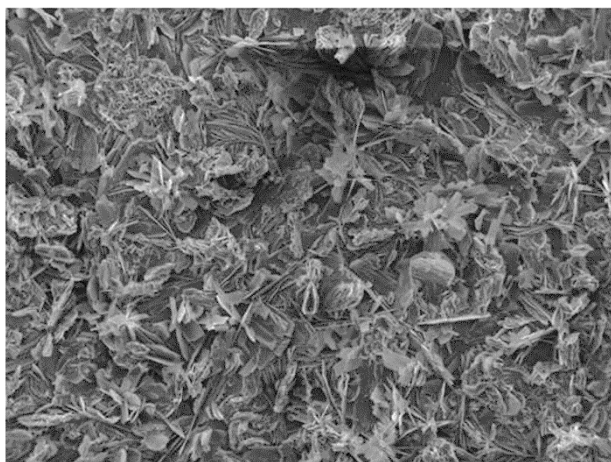
Po tomto procesu je polotovar téměř připraven na konečnou povrchovou úpravu. Součásti jsou však hladké a mazací směsi by na nich špatně ulpívaly, což by vedlo k nerovnoměrnému zatěžování nástrojů a tím k jejich poškození. Musí se tedy vytvořit nosná vrstva, na kterou se pak aplikuje dané mazivo. Ta se nejčastěji vytváří fosfátováním. Fosfátování je proces, při kterém je na povrch oceli nanášena vrstva solí kyseliny fosforečné (obr. 17). Tato vrstva ocel chrání velmi dobře před korozí, avšak má nízkou mechanickou pevnost a vysokou pórovitost. Ta může dosahovat až jedné desetiny procenta povrchu, je proto velmi vhodná pro následnou aplikaci maziva, které v této vrstvě ulpívá až třináctkrát lépe než na povrchu bez fosfátové vrstvy.

Během procesů protlačování dochází kvůli velkému silovému zatěžování k vysokému tření mezi nástroji a tvářeným materiálem. Aby byla zajištěna co nejvyšší životnost nástrojů, je často nutné důkladně připravit polotovary před samotným tvářením. Některé operace je možné provádět i bez dodatečného mazání či povrchové úpravy, jedná se ale o výjimečné případy.

Nejprve je nutné odstranit z materiálu povrchové nečistoty, jako jsou oxidy železa nebo zbytky maziva z předchozích operací. Odstranění probíhá v několika fázích. První fáze je mechanická, a provádí se buď kartáčováním, broušením nebo leštěním. Lze využít i tryskání, ale je zde nebezpečí ulpění tryskaného materiálu na polotovarech, což může vést ke zničení



Obr. 16 Závislost doby moření na koncentraci kyseliny sírové [13]



Obr. 17 Fosfátová vrstva pod elektronovým mikroskopem (100 x zvětšeno) [18]

Po aplikaci této vrstvy následuje finální povrchová úprava. U protlačování se jedná o aplikaci maziva na polotovary. Používají se směsi na bázi stearanu sodného nebo sulfidu molybdeničitého (obr. 18). Je prokázáno, že nejvhodnější jsou směsi polární. Dochází k chemické reakci s vrstvou fosforečnanů a tím ke vzniku tzv. kovových mýdel, jež fungují během procesu, jako dodatečné mazivo pro vysoké tlaky.

Při procesu přípravy polotovaru pro tváření za studena je optimální volit operace v následujícím sledu:

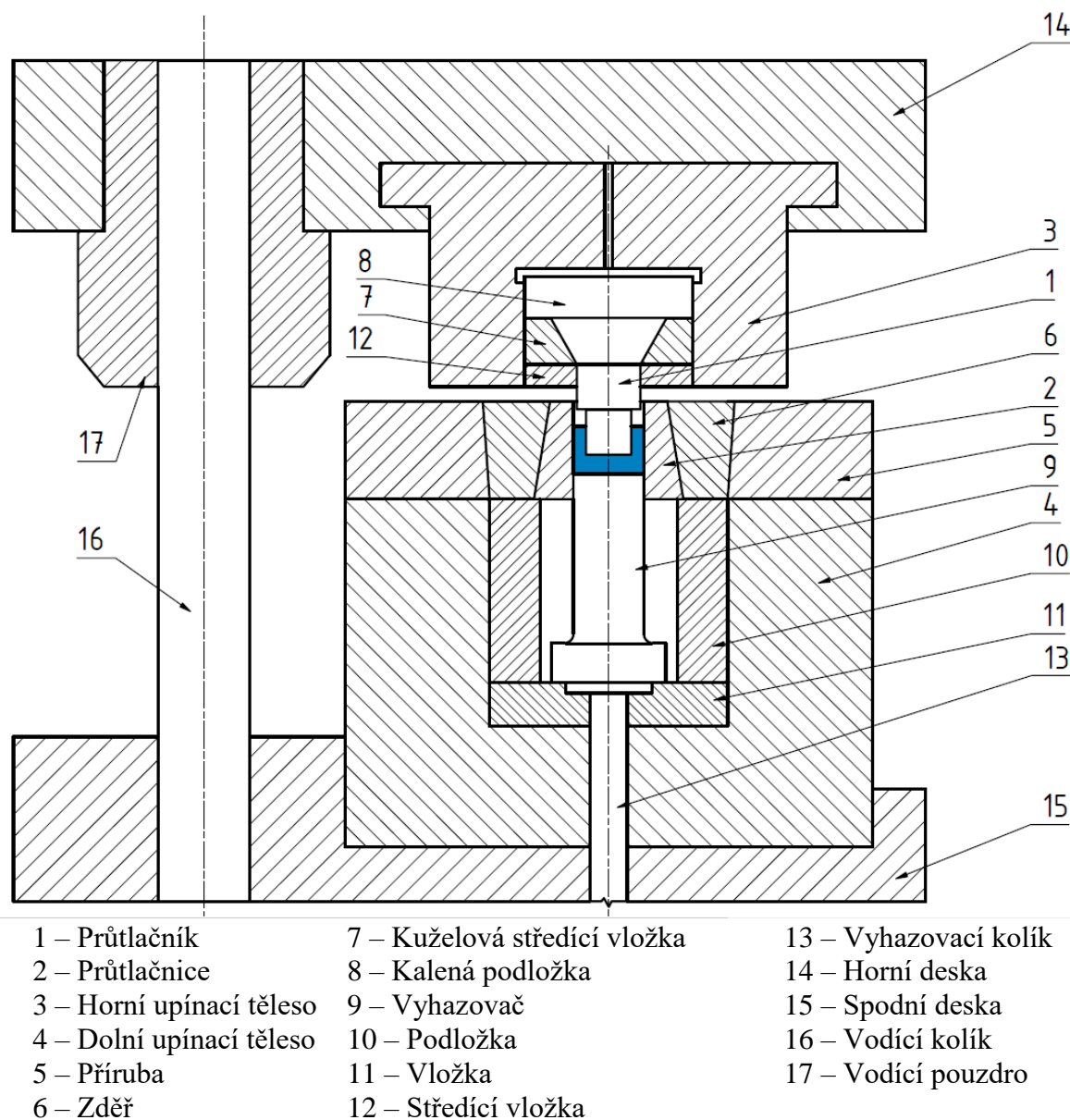
- mechanické odstranění nečistot,
- odmaštění v alkalické lázni při teplotě 90 °C,
- oplach horkou vodou – 80 °C,
- moření v roztoku kyseliny sírové o vhodné koncentraci při teplotě 50 – 70 °C,
- oplach horkou vodou,
- fosfátování při teplotě 50 – 90 °C, závisle na velikosti deformace, po dobu 5 – 20 min,
- oplach horkou vodou,
- neutralizační oplach – eliminace kyselého či zásaditého povrchu,
- sycení fosfátové vrstvy mazivem,
- sušení.



Obr. 18 Polotovary opatřeny vrstvou maziva na bázi MoS₂ [vl. tvorba]

2.5 Protlačovací nástroje [1], [3], [5]

Během protlačování dochází ke zpevňování tvářeného materiálu, vysokému tření mezi ním a nástroji a nerovnoměrnému tlakovému i teplotnímu namáhání. Z těchto důvodů musí být nástroje velmi pevné, tvrdé, mít nízkou hodnotu drsnosti povrchu, minimální sklon k elastické deformaci a v neposlední řadě musí být rovněž odolné proti otěru a teplotním vlivům. Všechny tyto vlastnosti výrazně ovlivňují životnost nástroje a tím i hospodárnost výroby. Musí být rovněž dodržena souosost průtlačníku a průtlačnice, k tomu slouží vodící stojánky. Schéma celého protlačovacího nástroje je na obrázku 19.



Obr. 19 Schéma protlačovacího nástroje pro kalíškování [3]

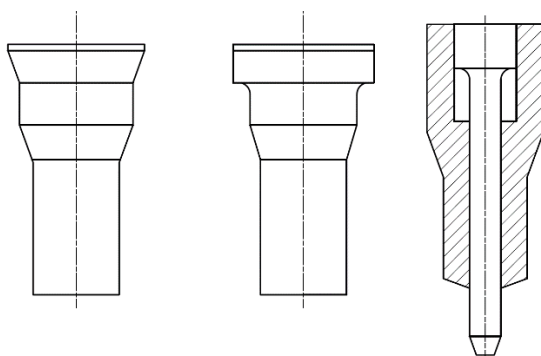
Volba materiálů pro protlačovací nástroje se musí řídit nejen podmínkami pro konečnou funkci, ale především i podmínkami pro jeho zpracování. Nejčastěji se při protlačování užívají vysokolegované oceli třídy 19. Při vhodném tepelném zpracování se vyznačují vysokými mechanickými vlastnostmi. Často se používá i povlakování funkčních částí nástrojů.

Dělí se na:

- Uhlíkové – mají většinou obsah uhlíku do 1,5 %, při vyšším množství uhlíku klesá jejich houževnatost. Ostatní přísadové prvky, jako je mangan, křemík nebo chrom i při velmi nízkém obsahu značně zvyšují prokalitelnost, u nástrojů o menších rozměrech však jejich větší koncentrace může vést k nerovnoměrnému prokalení a tím ke snížení pevnosti celého nástroje.
- Slitinové – používají se v případech, kdy nelze použít oceli uhlíkové. Mezi největší výhody se řadí zejména vyšší prokalitelnosti a vyšší tepelná stálost. Hlavními přísadami jsou karbidotvorné prvky jako jsou chrom, molybden, vanad, bor nebo wolfram. Jestliže se při ohřevu na kalící teploty rozpustí karbidy těchto prvků v austenitu, dojde ke značnému zvýšení prokalitelnosti materiálu. Tato vlastnost je zcela zásadní pro tepelné zpracování.

2.5.1 Průtlačníky [1], [3], [5]

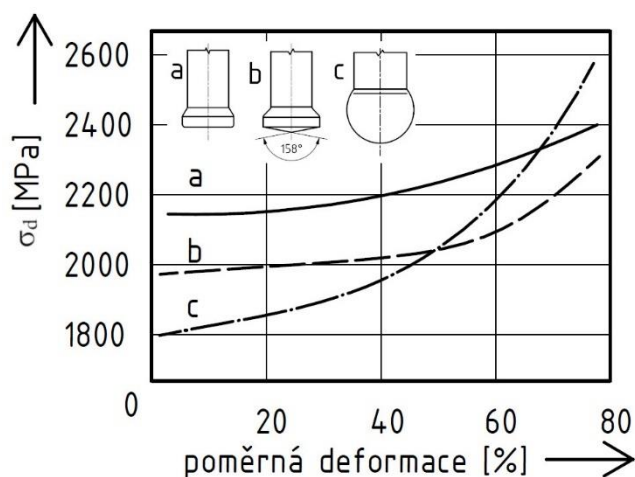
U dopředného protlačování je délka protlačku nezávislá na délce průtlačníku. Je však nutné dbát na to, aby funkční části bylo možné během výroby snadno vyměnit. Je nutné zajistit plynulé přechody mezi osazeními, aby nedocházelo ke koncentraci napětí a tím ke snížení



Obr. 20 Průtlačníky pro dopředné protlačování [1]

houževnatosti. Průtlačníky je možné vyrobit buď s válcovou nebo kuželovou hlavou, pro protlačování trubek je z hlediska pevnosti nástroje vhodnější volit průtlačníky složené. Častěji se volí průtlačník s kuželovou hlavou, protože je snadnější jej vystředit vůči průtlačnici. Při výrobě je nutné dodržet geometrické tolerance, jako je válcovitost, obvodové házení a kolmost. Průtlačníky pro dopředné protlačování se nachází na obrázku 20.

Průtlačníky pro zpětné protlačování jsou konstruovány především dle tvaru dna protlačku. Zpravidla bývají za funkční části odlehčené, aby vliv třecích sil nebyl tak markantní, funkční částí je pouze čelo a fazetka. Je empiricky dokázáno, že tvar čela průtlačníků má značný vliv na deformační odpor během tváření, tato závislost je graficky zobrazena na obrázku 21.



Obr. 21 Graf závislosti deformačního odporu na poměrné deformaci [1]

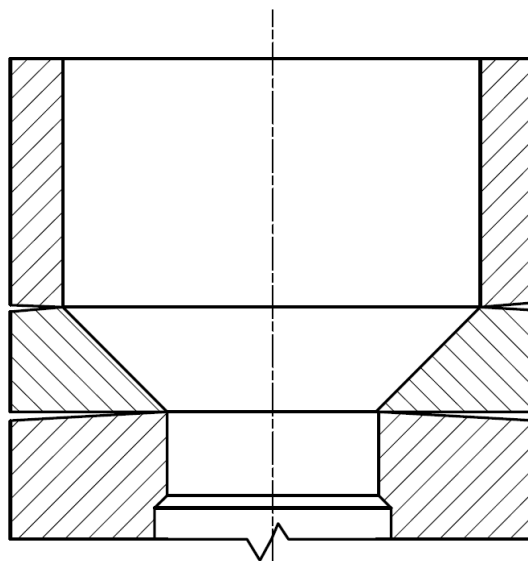
Tento graf platí pro ocel s obsahem uhlíku 0,1 %. Je patrné, že nejnižší odpor během většiny celého procesu je pro průtlačníky s kulovým čelem. Avšak při konci procesu deformační odpor značně stoupá, což by mohlo vést k příliš velké tvářecí síle a tím ke zvýšení nákladů na stroje. Optimální je varianta b, tedy kuželové čelo průtlačníku, zde odpor ve finální fázi také roste, avšak není to tak znatelné jako u varianty s čelem kulovým. Pokud tedy nejsou žádné požadavky na tvar dna, je vhodné volit tento tvar, protože se tím značně zvýší životnost nástroje.

2.5.2 Průtlačnice [1], [3], [5]

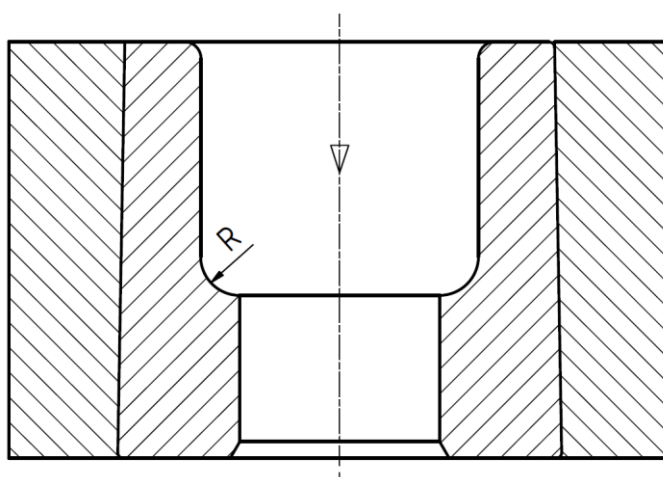
Průtlačnice jsou části nástroje, jež dávají výrobku jeho vnější tvar. Zpravidla jsou vyrobeny z nástrojových ocelí nebo ze slinutých karbidů. Samostatné průtlačnice jsou schopny unést radiální napětí do 1 000 MPa. Při vyšších tvářecích silách je nutno vyvinout radiální přepětí, aby se průtlačnice nepoškodily. Toho se dosahuje zapouzdřením průtlačnic do objímek neboli zděří. Radiální přepětí, který průtlačnice unesou s jednou objímkou je 1 600 MPa a se dvěma objímkami až 2 000 MPa. Zděře jsou na průtlačnice nalisovány za studena, a to na kuželovou plochu nebo za tepla na válcovou plochu. Průměry objímek vůči průtlačnici a přesahy pro nalisování jsou pevně dány tabulkou v příloze 3.

Průtlačnice pro dopředné protlačování se zpravidla skládají ze tří částí, válcového zásobníku, kuželové části a kalibračního oka. Je vhodné tyto komponenty vyrobit odděleně, díky čemuž se značně sníží vrubový účinek. Dále je průtlačnice odlehčená, aby nedocházelo ke zvyšování tvářecí síly, působením třecích vlivů. Schéma složené průtlačnice je na obrázku 22. Často dochází k tomu, že jedna součást protlačí druhou, ale hotové výrobky lze odstranit i vyhazovači, což ale zvyšuje výrobní časy a značně omezuje délku protlačků.

Průtlačnice pro zpětné protlačování jsou konstruovány dle vnějšího tvaru vyráběné součásti. Poloměr R značně snižuje vrubový účinek a tím životnost průtlačnice. Dutina je kuželová, aby bylo možné součást snadněji odstranit vyhazovačem. Pokud je správně nastaveno mazání, není nutné používat stírače, což snižuje náklady na nástroje. Schéma takové průtlačnice i se zděří se nachází na obrázku 23.



Obr. 22 Schéma složené průtlačnice pro dopředné protlačování [1]



Obr. 23 Schéma zděřované průtlačnice pro zpětné protlačování [1]

2.6 Stroje pro protlačování [3], [5]

Obecné požadavky na tvářecí stroje jsou vysoká tuhost konstrukce, přesné vedení beranu, dostatečný zdvih, síla a rychlost beranu. Všechny tyto parametry mají nezanedbatelný vliv na přesnost výlisků, životnost nástrojů i samotného stroje. Beran i vyhazovač jsou uloženy v rámu, což je nejčastěji odlitek z litiny s lupínkovým grafitem. Tento materiál velmi dobře pohlcuje rázy a vibrace, je tedy velmi vhodný pro takové konstrukce. Rámy strojů jsou do písmene O nebo C. Tvar O je vhodnější z důvodu vyšší tuhosti a životnosti. Je tak možné při tomto provedení vyrobit lisy s vyššími tvářecími silami.

2.6.1 Klikové lisy [3], [5]

Vyznačují se nízkými zdvihy, vysokými tvářecími rychlostmi a snadnému provedením. Nevýhodou těchto lisů je, že jmenovitá tvářecí síla je využitelná pouze do 30° natočení kliky. Z tohoto důvodu je vhodné použít lis, který má o 30 – 50 % větší jmenovitou sílu, než je potřebná síla ke tváření. Kliková hřídel je opatřena výstředníkovým pouzdrům, jež slouží k upravení výšky zdvihu. Tyto lisy jsou často používány jako postupové automaty, opatřeny transfery či roboty. Vyhazovače jsou buď řešeny samostatně nebo synchronně s pohybem beranu. Tato varianta je používanější, protože snižuje výrobní časy a tím zvyšuje produktivitu výroby. Příklad klikového lisu je na obrázku 24. Jedná se o klikový lis značky Weingarten s nominální silou 3 300 kN.



Obr. 24 Klikový lis Weingarten [vl. tvorba]

2.6.2 Hydraulické lisy [3], [5]

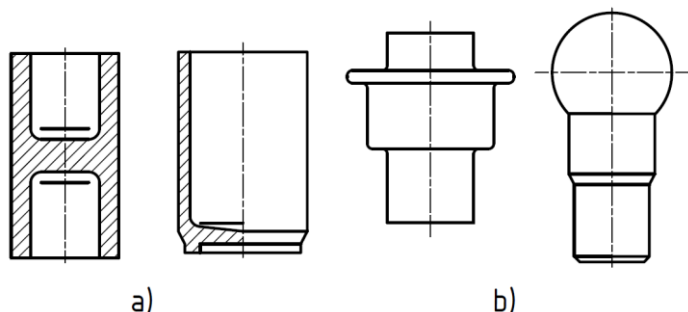
Tyto lisy jsou vhodné zejména pro dlouhé a rozměrné výrobky. Jejich největší výhodou je, že jsou schopny působit jmenovitou silou po celé délce zdvihu. Další výhodou hydraulických lisů je malá dosedací rychlost na materiál, dochází tak ke zvýšení životnosti nástrojů. Nevýhodou oproti klikovým lisům je nižší pracovní rychlost. Obecně platí, že provozní náklady jsou u těchto lisů vyšší než u lisů klikových. Avšak ne vždy je možné zvolit klikový lis, zvláště, jak už bylo řečeno, pro dlouhá tělesa. Hydraulické lisy nelze nikdy použít při práci v hořlavém prostředí nebo v prostředí s vysokými teplotami, protože je nebezpečí vznícení provozních kapalin. Příklad takového lisu je na obrázku 25. Jedná se o hydraulický lis Eitel s nominální silou 25 000 kN.



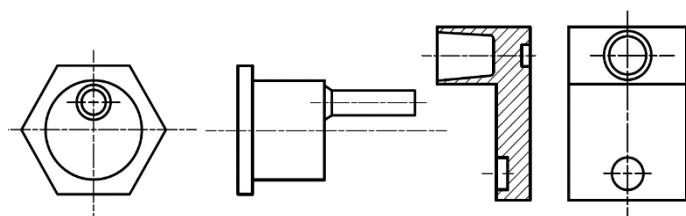
Obr. 25 Hydraulický lis Eitel [vl. tvorba]

2.7 Technologičnost [2], [3], [5]

Při výrobě protlačováním je nutné přizpůsobit tvar součásti této technologii. Nejvhodnější jsou součásti rotačně symetrické, především kalíškovité (obr. 26a) a čepové (obr. 26b). Lze ale vyrábět i součásti nesymetrické a tvarově složité (obr. 27). Při sestavování technologického

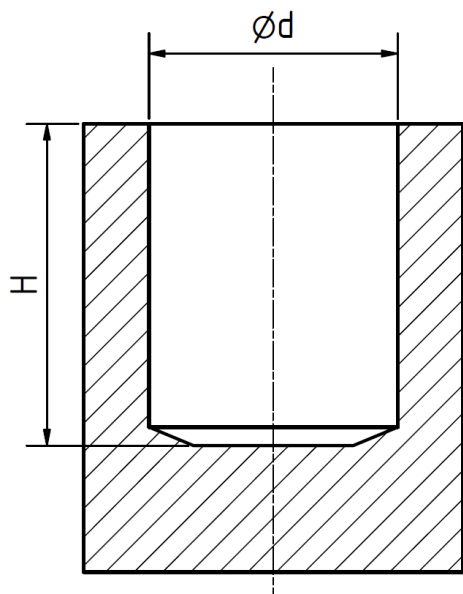


Obr. 26 Příklady kalíškových a čepových součástí [3]

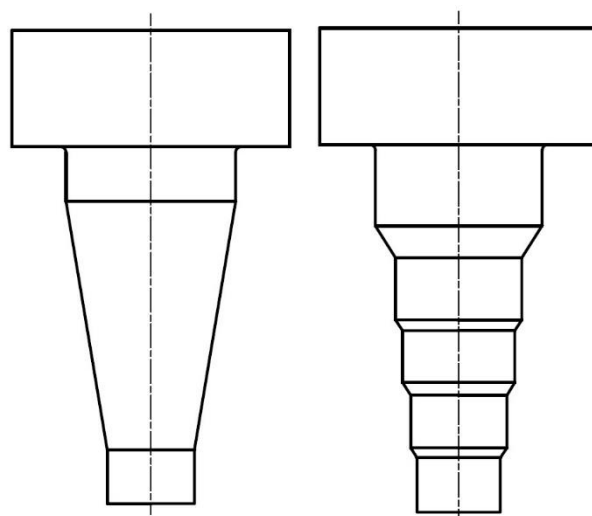


Obr. 27 Příklady nepravidelných součástí [3]

k nevhodnému toku materiálu, což může mít za následek vznikání trhlin. Pokud není možné tyto součásti upravit, například kvůli funkci hotového dílce, je vhodné přechody zmírnit kuzelem nebo zaoblením. Ostré rohy u kalíškovitých součástí lze vyrábět pouze pokud je tloušťka stěny menší než tloušťka dna. Dále je nutné dbát na to, aby hloubka H vtačovaného otvoru byla maximálně dvakrát vyšší, než je průměr d tohoto otvoru, jinak může dojít k poškození průtláčníků (obr. 28). Výroba součástí s vnitřním nebo vnějším kuzelem je velice náročná, neboť dochází ke značnému tření mezi tvářeným materiálem a nástroji, což snižuje jejich životnost. Je proto vhodné tyto plochy dokončit obráběním nebo je odstupňovat, pokud je to možné (obr. 29).



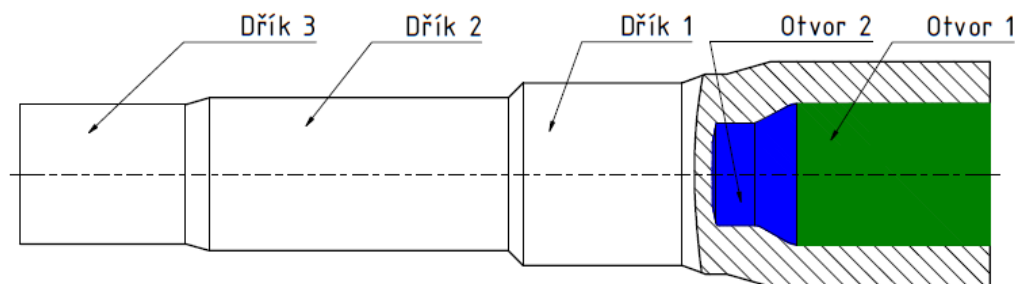
Obr. 28 Podmínka pro vtačování otvorů [vl. tvorba]



Obr. 29 Odstupňování čepu usnadní výrobu [3]

3 NÁVRH VÝROBY [3], [4], [5]

Řešenou součástí je rotačně symetrický čep s dutinou v hlavě. Největší průměr je 57 mm a celková délka je 249,5 mm. Vzhledem k funkci součásti byl zvolen materiál 27MnCrB7-2. Tato ocel nemá přímý ekvivalent v ČSN, ale dle chemického složení lze zařadit pod oceli třídy 14, tedy nízkolegované ušlechtilé oceli k zušlechťování. Velikost roční série je 200 000 ks. Schéma čepu, včetně popisu jednotlivých částí je na obrázku 30.



Obr. 30 Schéma čepu s popiskem [vl. tvorba]

Z hlediska technologičnosti je součást vyrobitelná protlačováním, nejsou zde ostré hrany či rohy. Přechody mezi rozdílnými průměry jsou řešeny úkosi, což výrobu značně usnadňuje, protože materiál teče snadněji a má tedy menší sklon ke vzniku trhlin. Požadavky na drsnost povrchu nejsou předepsány.

Podmínka pro vtlačování otvorů:

$$H \leq 2 \cdot d$$

kde: H – hloubka vtlačovaného otvoru [mm]

d – průměr otvoru [mm]

(3.1)

Pro otvor 1:

$$49,7 \leq 2 \cdot 36$$

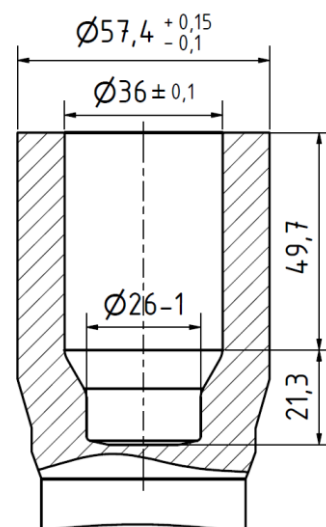
$$49,7 \text{ mm} \leq 72 \text{ mm}$$

Pro otvor 2:

$$21,3 \leq 2 \cdot 26$$

$$21,3 \text{ mm} \leq 52 \text{ mm}$$

Podmínka je v obou případech splněna, otvory tedy lze vyrobit protlačováním, aniž by došlo k poškození či zničení průtláčníků.



Obr. 31 Detail otvorů
[vl. tvorba]

3.1 Polotovár [2], [3], [21]

Jako polotovár byla zvolena za studena tažená tyč o průměru 57 mm s výrobní úchylkou h11. Obvykle se volí průměr polotovaru tak, aby bylo zpevnění ve dřívku stejné jako v hlavě. Ale jelikož v tomto případě nejsou žádné požadavky na mechanické vlastnosti, je možné zvolit jiný rozměr. Pokud by polotovarem byla tyč o jiném průměru, bylo by nutné do procesu zařadit další operace na korekci tohoto průměru, což by vedlo ke zvýšení nákladů o další nástrojovou sadu. Tyč o tomto průměru není v normě, ale jsou odebírány v dostatečném množství, nejen pro tuto konkrétní součást. Dodavateli se tedy vyplatí tyto tyče vyrobit.

Při určování délky výchozího polotovaru se vychází ze zákona zachování objemu. Objem byl určen pomocí programu Autodesk Inventor 2019, průměr byl zvolen dle největšího průměru součásti. Lze tedy určit jeho délku, pomocí následujícího vztahu:

$$V = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot L_0 \Rightarrow L_0 = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D_0^2} = \frac{4 \cdot 342\,918}{\pi \cdot 57^2} = 134,38 \text{ mm} \quad (3.2)$$

kde: V – objem součásti [mm³]

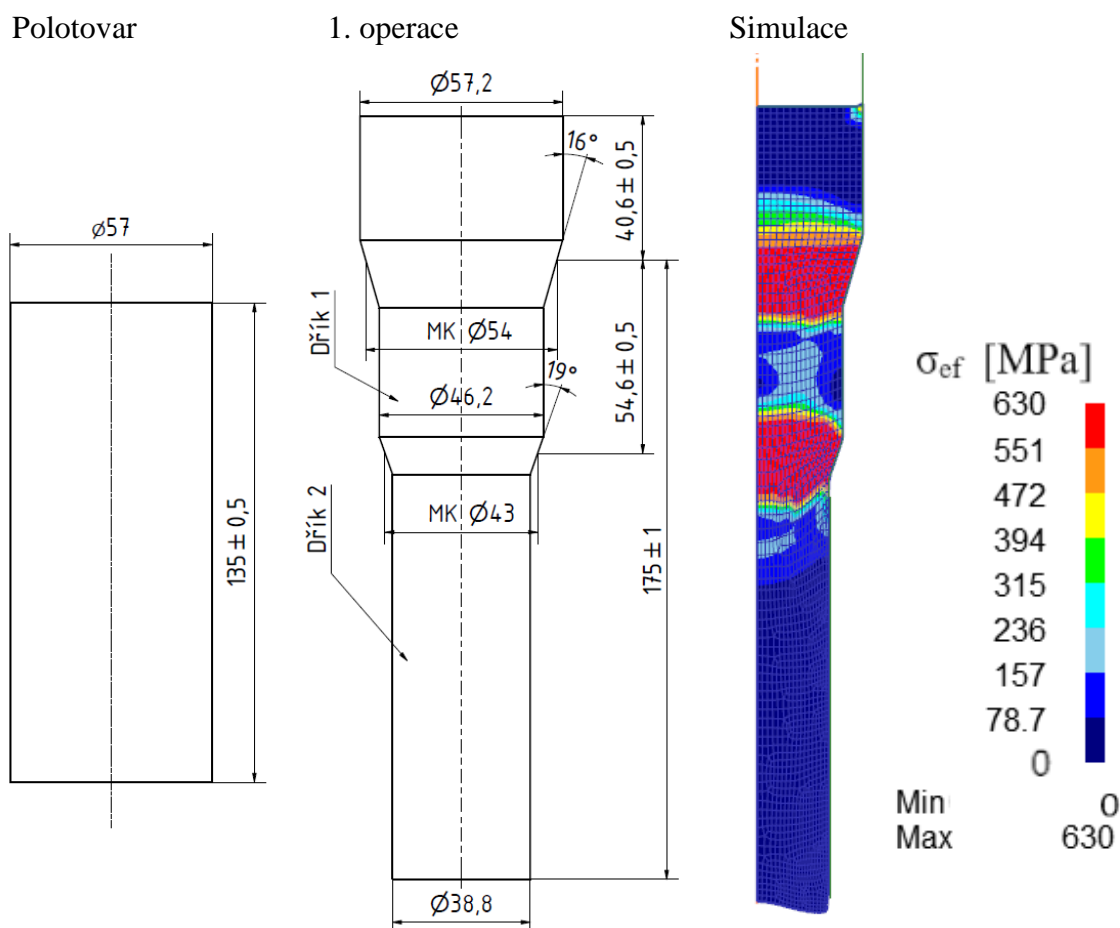
L_0 – délka polotovaru [mm]

Délka byla zaokrouhlena na 135 mm. Vzhledem k hodnotám délkových tolerancí lze toto zaokrouhlení provést a nebudou překročeny. Budou děleny na kotoučové pile a následně vyžihány a povrchově upraveny.

3.2 Technologický postup [21], [22]

Byl proveden schématický návrh výroby, avšak nebylo možné určit, zdali je to tímto způsobem v praxi proveditelné. Pomocí programů Autodesk Inventor 2019 a Deform 2D byly tedy určeny všechny rozměry v dílčích krocích tak, aby materiál tek l co nejlépe a aby se nevytvářely nežádoucí prvky jako přeložky či rýhy. Tímto byla situace dostatečně přiblížena realitě. Výroba byla navržena na tyto tvářecí operace:

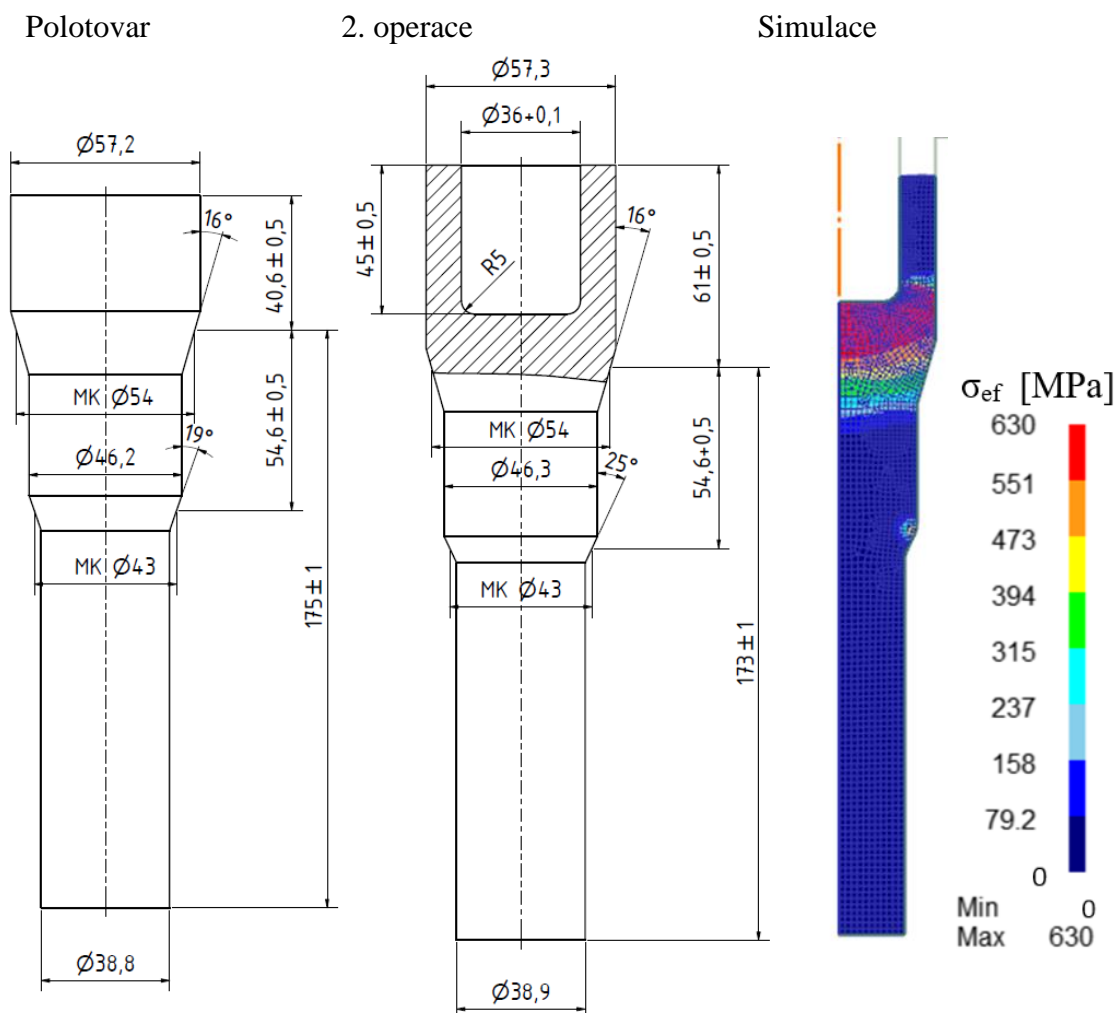
- Operace č. 1 (obr. 32) je zhotovení dřívku 1 a dřívku 2 dopředným protlačováním. Před touto operací je nutné polotovar rekrystalizačně vyžehat a povrchově upravit, tedy fosfátovat a molykovat. Z $\varnothing 57$ mm bude vyroben $\varnothing 46,2$ mm a zároveň $\varnothing 38,8$ mm. Vůle pro uložení polotovaru je 0,2 mm. Ze simulace lze vidět, že nejvíce namáhaná místa jsou právě redukční očka (obr. 33).



Obr. 32 Schéma první tvářecí operace [vl. tvorba]

Obr. 33 Simulace první operace [vl. tvorba]

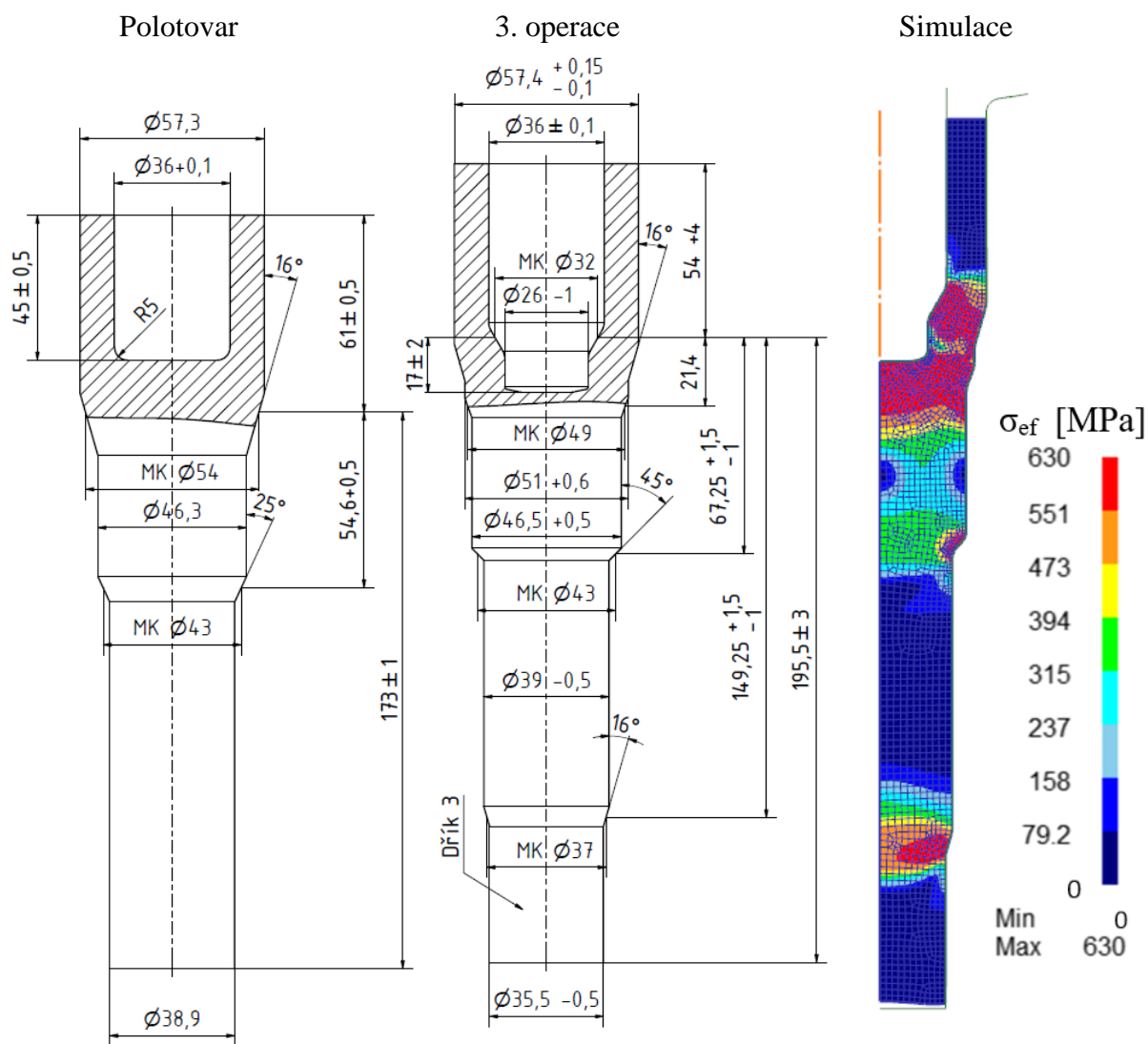
- Operace č. 2 (obr. 34) je zhotovení otvoru v součásti zpětným protlačováním. Průměr otvoru je 36 mm a jeho hloubka 45 mm. Vůle pro uložení součásti byla zvolena 0,1 mm na každém osazení. Ze simulace lze vidět, že nejvíce je namáhán materiál pod čelem průtláčnicku a v rozích (obr. 35), proto byl zvolen poloměr $R = 5$ mm.



Obr. 34 Schéma druhé tvářecí operace [vl. tvorba]

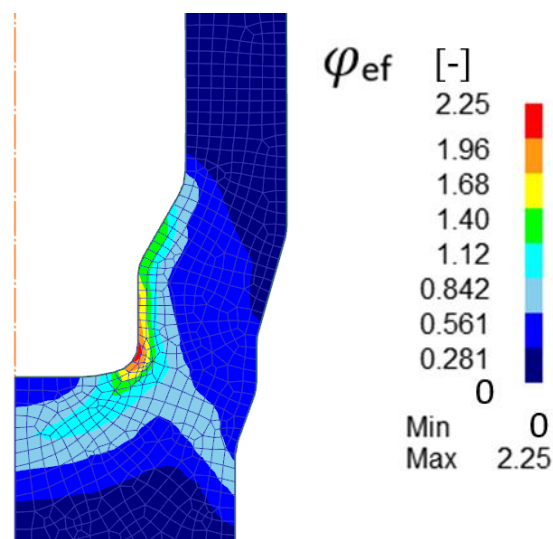
Obr. 35 Simulace druhé operace [vl. tvorba]

- Operace č. 3 (obr. 36) je kalibrace součásti, dopředným protlačením dířku 3 z Ø 38,9 mm na Ø 35,5 - 0,5 mm a zároveň zpětným protlačením menšího otvoru v hlavě o průměru 26 - 1 mm. Zároveň dojde k vytvoření Ø 51 + 0,6 v oblasti hlavy dílce. Vůle pro uložení byla na všech osazeních 0,1 mm. Před touto operací je však nutno provést obnovu plastických vlastností a nanést novou vrstvu maziva, tentokrát mýdlováním. Pokud by tak nebylo učiněno, vznikaly by na součásti rýhy či trhliny a docházelo by k výraznému snižování životnosti nástrojů. Ze simulace je patrné, že součást bude značně namáhána, a to především v oblasti hlavy a přechodů (obr. 37).



Obr. 36 Schéma třetí tvářecí operace [vl. tvorba] Obr. 37 Simulace třetí operace [vl. tvorba]

Kritické místo, kde hodnota efektivního přetvoření dosahuje hodnoty až 2,25 je zobrazeno na obrázku 38. V tomto místě může docházet k přechování materiálu a k jeho následnému porušení. Tuto vadu lze eliminovat zvětšením zaoblení na čele průtlačníku. Ale toto zaoblení nesmí být až příliš velké, protože by výrobek pak nemusel splňovat požadované tolerance. Proto bude nutné zavést zvýšenou četnost kontroly.



Obr. 38 Detail kritického místa [vl. tvorba]

3.3 Výpočty přetvoření, sil a prací [1], [2], [3], [4], [5], [22]

Jelikož pro zadaný materiál nebyly k dispozici křivky zpevnění, ze kterých by bylo možné určit deformační odpor, byla potřebná síla určena rovnou v simulačním programu Deform 2D.

Hodnoty přetvoření, síly a práce pro první tvářecí operaci:

Poměrné přetvoření v první operaci:

$$\varepsilon_1 = \frac{D_0^2 - D_2^2}{D_0^2} = \frac{57^2 - 38,8^2}{57^2} = 0,537 \quad (3.3)$$

kde: ε_1 – poměrné přetvoření v první operaci [-]

D_2 – průměr dřívku 2 [mm]

Skutečné přetvoření v první operaci:

$$\varphi_1 = \ln\left(\frac{D_0^2}{D_2^2}\right) = \ln\left(\frac{57^2}{38,8^2}\right) = 0,769 \quad (3.4)$$

kde: φ_1 – skutečné přetvoření v první operaci [-]

Práce v první operaci:

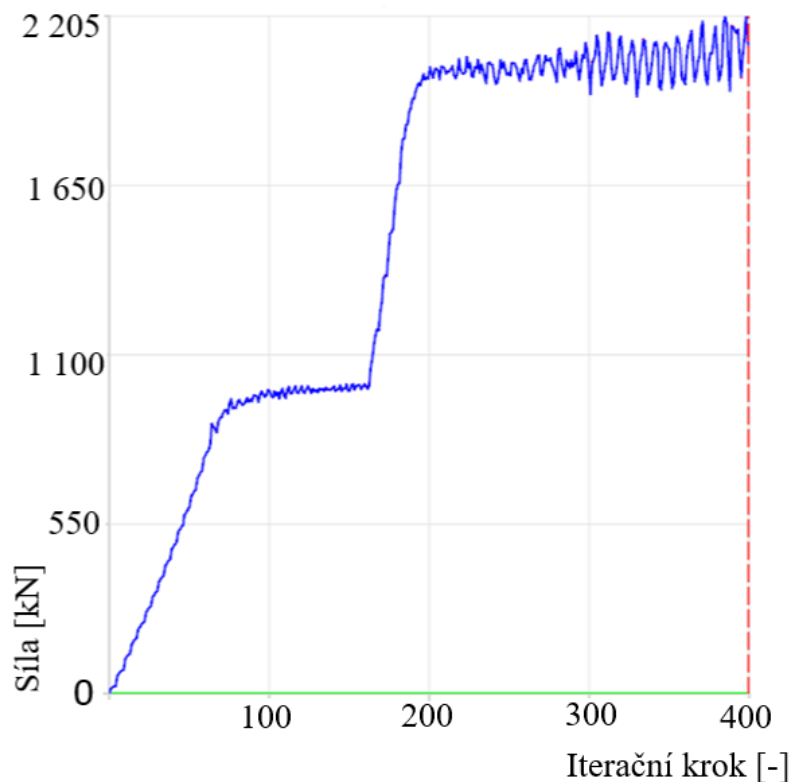
$$A_1 = \sigma_{ef} \cdot V \cdot \varphi_1 = 630 \cdot 342\,918 \cdot 10^{-3} \cdot 0,769 = 166\,133 \text{ J} \quad (3.5)$$

kde: A_1 – práce při první operaci [J]

σ_{ef} – efektivní napětí [MPa]

Síla byla určena z grafu (obr. 39), jež byl vykreslen programem Deform 2D.

Z grafu lze vyčíst maximální sílu během procesu: $F_1 = 2\,204\,962,7 \text{ N} = 2\,205 \text{ kN}$



Obr. 39 Průběh síly během první operace [vl. tvorba]

Hodnoty přetvoření, síly a práce pro druhou tvářecí operaci:

Poměrné přetvoření ve druhé operaci:

$$\varepsilon_2 = \frac{d_1^2}{D_{01}^2} = \frac{36^2}{57,2^2} = 0,396 \quad (3.6)$$

kde: ε_2 – poměrné přetvoření ve druhé operaci [-]

d_1 – průměr otvoru 1 [mm]

D_{01} – průměr D_0 po první tvářecí operaci [mm]

Skutečné přetvoření v první operaci:

$$\varphi_2 = \ln\left(\frac{D_{01}^2}{D_{01}^2 - d_1^2}\right) = \ln\left(\frac{57,2^2}{57,2^2 - 36^2}\right) = 0,504 \quad (3.7)$$

kde: φ_2 – skutečné přetvoření ve druhé operaci [-]

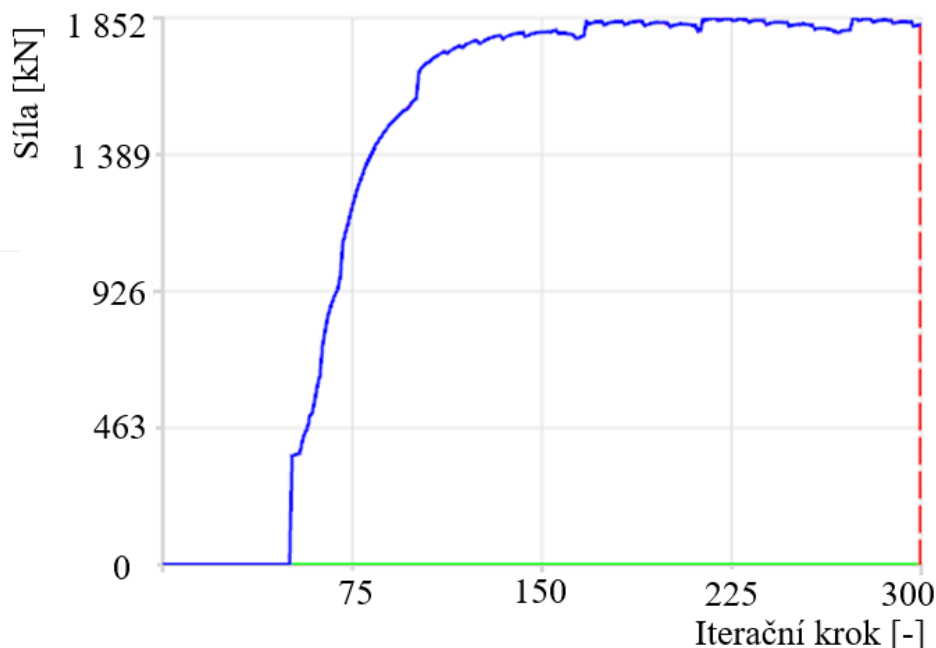
Práce ve druhé operaci:

$$A_2 = \sigma_{ef} \cdot V \cdot \varphi_2 = 630 \cdot 342\,918 \cdot 10^{-3} \cdot 0,504 = 108\,883 \text{ J} \quad (3.8)$$

kde: A_2 – práce při druhé operaci [J]

Síla byla určena z grafu (obr. 40), jež byl vykreslen programem Deform 2D.

Z grafu lze vyčíst maximální sílu během procesu: $F_2 = 1\,852\,109,9 \text{ N} = 1\,852 \text{ kN}$



Obr. 40 Průběh síly během druhé operace [vl. tvorba]

Hodnoty přetvoření, síly a práce pro třetí tvářecí operaci (hlava):

Poměrné přetvoření ve třetí operaci (hlava):

$$\varepsilon_{3h} = \frac{d_2^2}{D_{02}^2} = \frac{26^2}{57,3^2} = 0,206 \quad (3.9)$$

kde: ε_{3h} – poměrné přetvoření ve třetí operaci (hlava) [-]

d_2 – průměr otvoru 2 [mm]

Skutečné přetvoření ve třetí operaci (hlava):

$$\varphi_{3h} = \ln\left(\frac{D_{02}^2}{D_{02}^2 - d_2^2}\right) = \ln\left(\frac{57,3^2}{57,3^2 - 26^2}\right) = 0,231 \quad (3.10)$$

kde: φ_{3h} – skutečné přetvoření ve třetí operaci (hlava) [-]
 D_{02} – průměr D_0 po druhé tvářecí operaci [mm]

Práce ve třetí operaci (hlava):

$$A_{3h} = \sigma_{ef} \cdot V \cdot \varphi_{3h} = 630 \cdot 342\,918 \cdot 10^{-3} \cdot 0,231 = 49\,905 \text{ J} \quad (3.11)$$

kde: A_{3h} – práce při třetí operaci (hlava) [J]

Hodnoty přetvoření, síly a práce pro třetí tvářecí operaci (dřík):

Poměrné přetvoření ve třetí operaci (dřík):

$$\varepsilon_{3d} = \frac{D_{22}^2 - D_3^2}{D_{22}^2} = \frac{38,9^2 - 35,5^2}{38,9^2} = 0,167 \quad (3.12)$$

kde: ε_{3d} – poměrné přetvoření ve třetí operaci (dřík) [-]
 D_{22} – průměr dříku 2 po 2. operaci [mm]
 D_3 – průměr dříku 3 [mm]

Skutečné přetvoření ve třetí operaci (dřík):

$$\varphi_{3d} = \ln \left(\frac{D_{22}^2}{D_3^2} \right) = \ln \left(\frac{38,9^2}{35,5^2} \right) = 0,183 \quad (3.13)$$

kde: φ_{3d} – skutečné přetvoření ve třetí operaci (dřík) [-]

Práce ve třetí operaci (dřík):

$$A_{3d} = \sigma_{ef} \cdot V \cdot \varphi_{3d} = 630 \cdot 342\,918 \cdot 10^{-3} \cdot 0,183 = 39\,535 \text{ J} \quad (3.14)$$

kde: A_{3d} – práce při třetí operaci (dřík) [J]

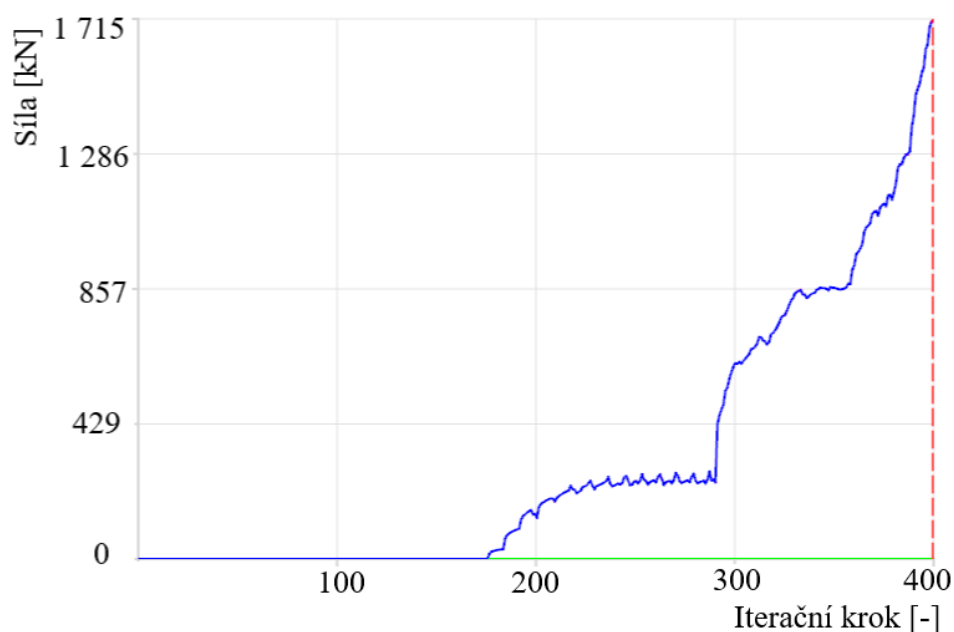
Celková práce při třetí operaci:

$$A_3 = A_{3h} + A_{3d} = 49\,905 + 39\,535 = 89\,440 \text{ J} \quad (3.15)$$

kde: A_3 – celková práce při třetí operaci [J]

Síla byla určena z grafu (obr. 41), jež byl vykreslen programem Deform 2D.

Z grafu lze vyčíst maximální sílu během procesu: $F_3 = 1\,714\,699,8 \text{ N} = 1\,715 \text{ kN}$



Obr. 41 Průběh síly ve třetí operaci [vl. tvorba]

Výpočtem bylo potvrzeno, že před třetí operací bude potřeba obnovit plastické vlastnosti. Dle tabulky 3 lze totiž tvrdit, že byly vyčerpány. Dolní hranice platí pro oceli s vyšším obsahem uhlíku nebo oceli legované. Zadaná ocel se dle přílohy 1 řadí mezi materiály s vysokým deformačním odporem a nižší tvařitelností, proto lze tvrdit, že pro ni platí ona spodní hranice. Jelikož bylo v první operaci skutečné přetvoření $\varphi_1 = 0,769$ po dopředném protlačování a ve druhé operaci $\varphi_2 = 0,504$ pro zpětné, pohybujeme se okolo horní hranice a v praxi byla tato skutečnost rovněž potvrzena.

Tabulka 3 Maximální dovolené redukce při protlačování [3]

Způsob protlačování	ε [-]	φ [-]
Zpětné	0,40 – 0,75	0,51 – 1,4
Dopředné uzavřené	0,30 – 0,90	0,37 – 3,0

3.4 Návrh nástroje [1], [3], [5], [21]

První dvě operace budou zhotoveny v postupovém nástroji. Obě tyto sestavy budou uloženy v masivních upínacích tělesech a hydraulicky upnuty k beranu (horní upínací těleso) nebo ke stolu (dolní upínací těleso) lisu. Třetí sestava bude samostatně v upínacím tělese, které však bude připevněno šrouby k beranu i stolu. Ani v jednom z případů není nutné použít vodící sloupky, protože vedení beranu lisu je dostatečně přesné. Průtlačníky a průtlačnice budou vyrobeny z nástrojové oceli 19 436 a následně tepelně zpracovány na 58 + 2 HRC.

Nástroj pro první operaci:

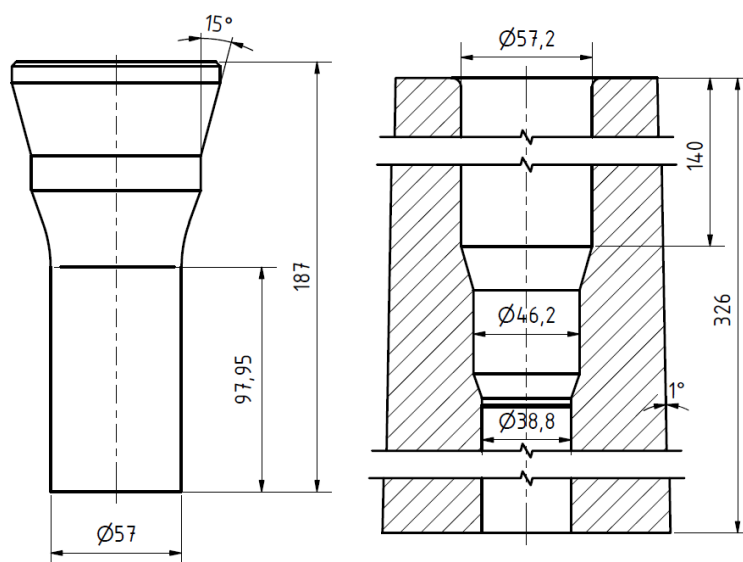
Jedná se o dopředné protlačování, průtlačník byl zvolen jednoduchý s kuželovou hlavou, která s kuželovou vložkou bude sloužit k jeho upnutí. Konkrétní rozměry byly určeny podle přílohy 2 a upraveny dle výsledků ze simulací (obr. 42).

Průtlačnice pro první operaci bude obsahovat dvě redukční části viz obrázek 42. Ve spodní části bude průtlačnice odlehčená, aby nedocházelo k velkému tření a tím ke zvyšování tvářecí síly a ke snížení její životnosti. Velikosti redukčních úhlů a zaoblení hran byly zvoleny na základě simulace tak, aby docházelo k co nejsnadnějšímu toku materiálu a nedocházelo k jeho porušování, pěchování či tvoření přeložek.

Její vnější průměr byl zvolen podle přílohy 3, jež říká, že vnější průměr je roven dvojnásobku největšího vnitřního průměru průtlačnice, tedy $57,2 \cdot 2 = 114,4$ mm. Pro zjištění, zda je potřeba zapouzdřit průtlačnici do objímky je nutné znát radiální napětí. Pro určení jeho hodnoty je však nutné znát velikost deformačního odporu. Ten lze zpětně zjistit z velikosti působící síly, pomocí vztahu:

$$\sigma_{d1} = \frac{F_1}{S_{p1}} = \frac{2\,204\,963}{2\,569,7} = 858,1 \text{ MPa} \quad (3.16)$$

kde: σ_{d1} – deformační odpor v první operaci [MPa]



Obr. 42 Schéma nástrojů pro první operaci [vl. tvorba]

S_{p1} – činná plocha průtlačníku v první operaci [mm^2]

$$S_{p1} = \frac{\pi \cdot 57,2^2}{4} = 2\,569,7 \text{ mm}^2$$

Radiální napětí se určí pomocí následujícího vztahu:

$$\sigma_{r1} = \sigma_{d1} \cdot \frac{1}{a^2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{r_2^2}{r_1^2}\right) = 858,1 \cdot \frac{1}{2^2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{57,2^2}{28,6^2}\right) = -858,1 \text{ MPa}$$

kde: σ_{r1} – radiální napětí v první operaci [MPa]

r_1 – vnitřní poloměr průtlačnice [mm]

r_2 – vnější poloměr průtlačnice [mm]

a – poměrný poloměr [-]

$$a = \frac{r_2}{r_1} = \frac{57,2}{28,6} = 2$$

Dle výpočtu nebude třeba zapouzdřit průtlačnici do objímky, ale pokud to bude provedeno, zvýší se její životnost. Její vnitřní průměr bude 114,4 mm a vnější průměr dle přílohy 3 bude $D_3 = 250$ mm. Lisovací přesah bude:

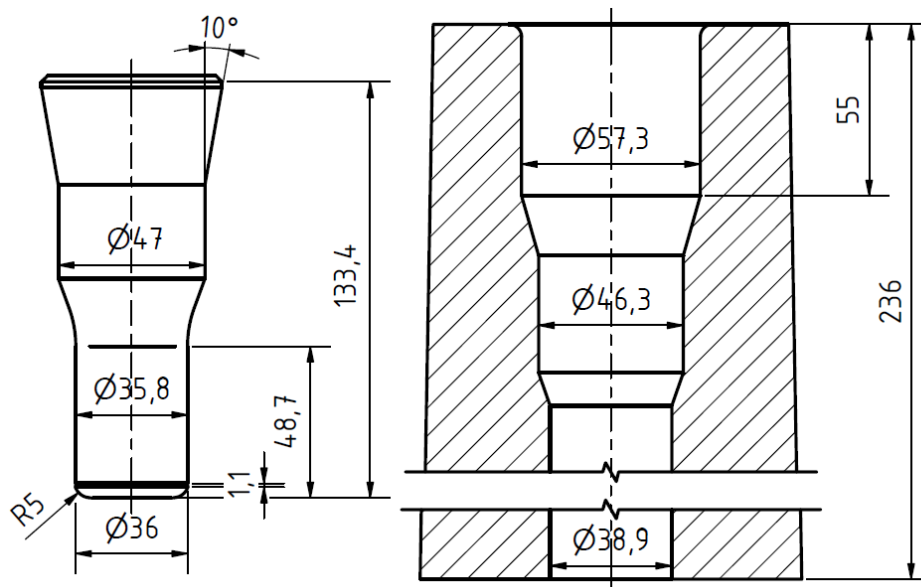
$$\Delta d_1 = 0,006 \cdot D_3 = 0,006 \cdot 114 = 0,46 \text{ mm} \quad (3.18)$$

kde: Δd_1 – lisovací přesah pro první objímku [mm]

Nástroj pro druhou operaci:

Jedná se o zpětné protlačování, průtlačník (obr. 43) byl zvolen opět jednoduchý s kuželovou hlavou. Konkrétní rozměry byly určeny podle přílohy 2 a opět upraveny podle simulace tak, aby bylo možné zhotovit první dvě operace zároveň při jednom zdvihu.

Průtlačnice pro druhou operaci bude s vůlí 0,1 mm na každém osazení kopírovat vnější tvar po první operaci, viz obrázek 43. Součástí tohoto nástroje musí být i kalená podložka, která zabrání v dopředném tečení materiálu.



Obr. 43 Schéma nástrojů pro druhou operaci [vl. tvorba]

Vnější průměr byl určen stejným způsobem jako v předchozím případě. Tedy vnější průměr průtlačnice je roven $57,3 \cdot 1,75 \doteq 100$ mm. Pro zjištění počtu a velikosti potřebných bandáží je nutné provést obdobný výpočet jako v předchozí operaci:

$$\sigma_{d2} = \frac{F_2}{S_{p2}} = \frac{1\,852\,110}{1\,017,9} = 1\,819,5 \text{ MPa} \quad (3.19)$$

kde: σ_{d2} – deformační odpor ve druhé operaci [MPa]

S_{p2} – činná plocha průtlačníku ve druhé operaci [mm²]

$$S_{p2} = \frac{\pi \cdot 36^2}{4} = 1\,017,9 \text{ mm}^2$$

Radiální napětí se určí pomocí následujícího vztahu: (3.20)

$$\sigma_{r2} = \sigma_{d2} \cdot \frac{1}{a^2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{r_2^2}{r_1^2}\right) = 1\,819,5 \cdot \frac{1}{1,75^2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{50^2}{28,65^2}\right) = -1\,795,3 \text{ MPa}$$

kde: σ_{r2} – radiální napětí ve druhé operaci [MPa]

$$a = \frac{r_2}{r_1} = \frac{50}{28,65} = 1,75$$

Dle výpočtu bylo zjištěno, že je nutné průtlačnici zapouzdřit do dvou bandáží (obr. 44). Vnitřní průměr první zděře bude $D_{z2} = 100 \text{ mm}$ a vnější průměr dle přílohy 3 bude $D_{z3} = 170 \text{ mm}$, což je zároveň vnitřní průměr druhé objímky, jejíž vnější průměr byl stanoven na $D_{z4} = 286 \text{ mm}$. Lisovací přesahy budou:

$$\Delta d_{10} = 0,005 \cdot D_{z2} = 0,005 \cdot 100 = 0,5 \text{ mm} \quad (3.21)$$

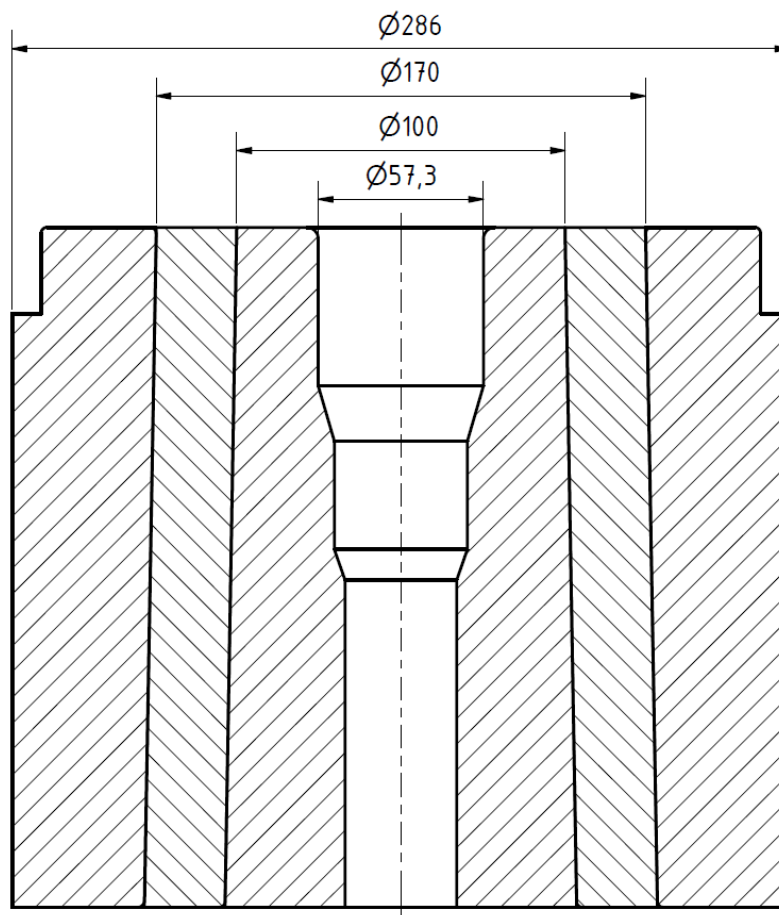
kde: Δd_{10} – lisovací přesah pro průtlačnici ve druhé operaci [mm]

D_{z2} – vnitřní průměr první zděře [mm]

$$\Delta d_{20} = 0,004 \cdot D_{z3} = 0,004 \cdot 170 = 0,68 \text{ mm} \quad (3.22)$$

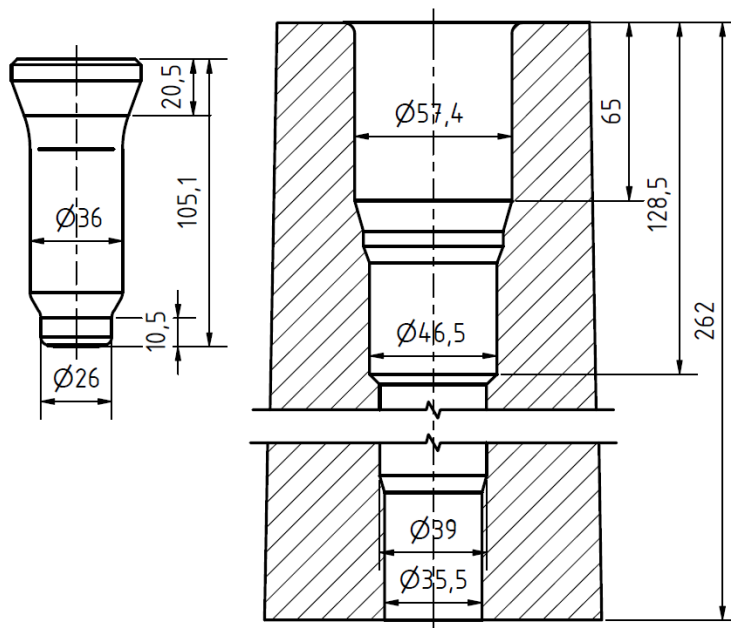
kde: Δd_{20} – lisovací přesah pro první objímku ve druhé operaci [mm]

D_{z3} – vnitřní průměr druhé zděře [mm]



Obr. 44 Zděrovaná průtlačnice [vl. tvorba]

Nástroj pro třetí operaci (obr. 45):



Obr. 45 Schéma nástrojů pro třetí operaci [vl. tvorba]

Jedná se o kalibraci, v níž je zařazeno dopředné i zpětné protlačování. Průtlačník byl zvolen jednoduchý s osazením. Jeho tvar a rozměry jsou dány rozměry dutiny hotového výrobku. Průtlačnice pro třetí operaci bude mít tvar daný vnějšími rozměry hotového výrobku. Byla zvolena průtlačnice nedělená. Pro určení vnějšího rozměru bude použit stejný postup, jako v předchozích případech:

$$\sigma_{d3} = \frac{F_3}{S_{p3}} = \frac{1\,715\,699,3}{1\,017,9} = 1685,5 \text{ MPa} \quad (3.23)$$

kde: σ_{d3} – deformační odpor ve třetí operaci [MPa]

S_{p3} – činná plocha průtlačníku ve třetí operaci [mm²]

$$S_{p3} = \frac{\pi \cdot 36^2}{4} = 1\,017,9 \text{ mm}^2$$

Radiální napětí:

$$\sigma_{r3} = \sigma_{d3} \cdot \frac{1}{a^2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{r_2^2}{r_1^2}\right) = 1685,5 \cdot \frac{1}{1,74^2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{50^2}{28,7^2}\right) = -1691,8 \text{ MPa} \quad (3.24)$$

kde: σ_{r3} – radiální napětí ve třetí operaci [MPa]

$$a = \frac{r_2}{r_1} = \frac{50}{28,7} = 1,74$$

Dle výpočtu bude třeba zapouzdřit průtlačnici do dvou objímek, jež budou na průtlačnici nalisovány za studena. Pro rozměry zděří byly zvoleny stejné hodnoty, jako ve druhé operaci (obr. 44). Rozdíl vnitřních průměrů lze zanedbat, protože se jedná pouze o 0,1 mm.

Objímky budou vyrobeny z materiálu 19 423 a zušlechtěny na 50 + 2 HRC. Funkční rozměry průtlačnic je nutné brousit a leštit až po zapouzdření, při kterém se postupuje od vnějších objímek směrem k průtlačnici. Ve všech případech bude průtlačnice kuželová, aby bylo možné bandáže snadněji nalisovat a aby byla zajištěna samosvornost.

3.5 Volba stroje [3], [5]

Pro správnou volbu stroje je nutné znát velikost nástroje, potřebnou sílu a je vhodné zohlednit lisovací rychlost v podobě počtu zdvihů za minutu.

První dvě operace budou prováděny současně, je tedy nutné znát celkovou sílu a vynásobit ji koeficientem bezpečnosti. Bude vhodnější volit hydraulický lis, protože dokáže působit jmenovitou silou po velké dráze, což je důležité během obou operací. Celková síla pro první dvě operace je:

$$F_{12} = F_1 + F_2 = 2\,205 + 1\,852 = 4\,057 \text{ kN}$$

kde: F_{12} – celková tvářecí síla v prvních dvou operacích [kN]

Koeficient bezpečnosti byl zvolen $k = 2,5$, celková síla pro dimenzování lisu je:

$$F_{c1} = k \cdot F_{12} = 2,5 \cdot 4\,057 = 10\,142,5 \text{ kN}$$

kde: F_{c1} – síla pro dimenzování lisu pro první tvářecí krok [kN]

k – koeficient bezpečnosti [-]

Třetí operace bude prováděna samostatně na klikovém lisu, protože síla, potřebná k přetvoření může působit na krátké dráze. Stejně jako v předchozím případě je nutné určit sílu pro dimenzování, $k = 2,5$.

$$F_{c2} = k \cdot F_3 = 2,5 \cdot 1\,715 = 4\,287,5 \text{ kN}$$

kde: F_{c2} – síla pro dimenzování lisu pro druhý tvářecí krok [kN]

Na základě těchto parametrů byl pro první tvářecí krok zvolen postupový hydraulický lis Schüler p200 (obr. 46), jsou využity pouze dvě lisovací pozice, ale v tomto případě, nelze provést více operací, jelikož jsou po druhé operaci vyčerpány plastické vlastnosti. Pro druhý krok byl zvolen klikový lis Krupp p63. Oba tyto stroje jsou součástí strojového parku firmy Metaldyne Oslavany. Jejich parametry jsou v tabulce 4.

Tabulka 4 Technické parametry lisů

Lis	-	Schüler p200	Krupp p63
Jmenovitá síla	[kN]	20 000	6 300
Zdvih	[mm]	630	400
Počet lisovacích pozic	[-]	5	1
Počet zdvihů za minutu	[min ⁻¹]	32	6



Obr. 46 Hydraulický lis Schüler p200 [20]

4 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ [3], [19]

Naprosto nezbytnou záležitostí pro každý výrobní proces je ekonomické zhodnocení navrženého postupu. Toto zhodnocení se bude zabývat pouze náklady na materiál, povrchovou úpravu, tepelné zpracování a cenou nástroje. Nebudou započítány náklady na mzdy, energie, údržbu či režie. Cílem bude určit bod zvratu, při kterém série začne generovat zisk při marži 30 %, avšak tohle číslo bude pouze orientační, jelikož bylo zanedbáno několik faktorů, jako jsou režie, mzdy, energie a další.

- Vstupní materiál:

Jako polotovar byl zvolen špalík o průměru 57 mm a délce 135 mm. Tyče jsou dodávány v délce 6 000 mm, délka 80 mm je nutná pro upnutí tyče do řezačky. Polotovary budou děleny na kotoučové pile, rezný kotouč má šířku 1 mm. Výrobní série je 200 000 ks / rok.

Počet přířezů z jedné tyče:

$$n_p = \frac{l_t - l_{nt}}{l_p + š_k} = \frac{6\,000 - 80}{135 + 1} = 43,85 \text{ ks} \quad (4.1)$$

kde: n_p – počet přířezů z jedné tyče [ks]

l_t – délka tyče [mm]

l_{nt} – délka nevyužitého konce tyče [mm]

l_p – délka polotovaru [mm]

$š_k$ – šířka rezného kotouče [mm]

Z jedné tyče lze získat 43 ks polotovarů.

Počet tyčí pro celou sérii 200 000 ks:

$$n_t = \frac{n_r}{n_p} = \frac{200\,000}{43} = 4651,16 \text{ ks, volím } n_t = 4\,652 \text{ ks} \quad (4.2)$$

kde: n_t – celkový počet tyčí [ks]

n_r – velikost série [ks]

Pro zajištění roční produkce 200 000 ks bude potřeba 4 652 tyčí.

Hmotnost jedné tyče:

$$m_{1t} = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot l_t \cdot \rho_{ocel} \cdot 10^{-9} = \frac{\pi \cdot 57^2}{4} \cdot 6\,000 \cdot 7\,850 \cdot 10^{-9} = 120,19 \text{ kg} \quad (4.3)$$

kde: m_{1t} – hmotnost jedné tyče [kg]

D_0 – průměr polotovaru [mm]

ρ_{ocel} – hustota oceli [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

Jedna tyč má tedy hmotnost 120,19 kg.

Hmotnost všech tyčí:

$$m_t = m_{1t} \cdot n_t = 120,19 \cdot 4\,652 = 559\,123,88 \text{ kg} \quad (4.4)$$

kde: m_t – hmotnost všech tyčí [kg]

Celková hmotnost vstupního materiálu je tedy 559 123,88 kg.

Náklady na vstupní materiál:

$$N_{vs} = m_t \cdot C_{kg} = 559\,123,88 \cdot 22 = 12\,300\,725 \text{ Kč} \quad (4.5)$$

kde: N_{vs} – náklady na vstupní materiál [Kč]

C_{kg} – cena za 1 kg materiálu [$\text{Kč} \cdot \text{kg}^{-1}$]

Celkové náklady na vstupní materiál budou 12 300 725 Kč.

- Náklady na rekrytalizační žihání:

$$N_{r\check{z}} = n_r \cdot n_{\check{z}} \cdot C_{r\check{z}} = 200\,000 \cdot 2 \cdot 6 = 2\,400\,000 \text{ Kč} \quad (4.6)$$

kde: $N_{r\check{z}}$ – náklady na rekrytalizační žihání [Kč]

$n_{\check{z}}$ – počet žihacích operací [ks]

$C_{r\check{z}}$ – cena žihání jednoho kusu [Kč · ks⁻¹]

Celkové náklady na žihání budou 2 400 000 Kč.

- Náklady na povrchovou úpravu:

$$N_{p\acute{u}} = n_r \cdot n_{p\acute{u}} \cdot C_{p\acute{u}} = 200\,000 \cdot 2 \cdot 4 = 1\,600\,000 \text{ Kč} \quad (4.7)$$

kde: $N_{p\acute{u}}$ – náklady na povrchovou úpravu [Kč]

$n_{p\acute{u}}$ – počet operací povrchové úpravy [ks]

$C_{p\acute{u}}$ – cena povrchové úpravy jednoho kusu [Kč · ks⁻¹]

Celkové náklady na povrchovou úpravu budou 1 600 000 Kč.

- Zisk z vrácení nevyužitého kovu:

Hmotnost odpadu, vzniklého třískovým dělením a z nevyužitelných konců tyčí:

$$m_{odp} = m_t - \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot l_p \cdot \rho_{ocel} \cdot 10^{-9} \cdot n_r = \quad (4.8)$$

$$= 559\,123,88 - \frac{\pi \cdot 57^2}{4} \cdot 134 \cdot 7850 \cdot 10^{-9} \cdot 200\,000 = 22\,284,9 \text{ kg}$$

kde: m_{odp} – hmotnost odpadu [kg]

Celková hmotnost odpadu je 22 284,9 kg.

Cena za vrácení odpadu:

$$C_{odp} = m_{odp} \cdot C_{1kg} = 22\,284,9 \cdot 3 = 66\,855 \text{ Kč} \quad (4.9)$$

kde: C_{odp} – cena za vratný kov [Kč]

C_{1kg} – cena za 1 kg vratného kovu [Kč · kg⁻¹]

Vrácením nevyužitelného materiálu je získáno 66 855 Kč.

- Celkové variabilní náklady:

$$N_{var} = N_{vs} + N_{r\check{z}} + N_{p\acute{u}} - C_{odp} =$$

$$= 12\,300\,725 + 2\,400\,000 + 1\,600\,000 - 66\,855 = 16\,233\,870 \text{ Kč} \quad (4.10)$$

kde: N_{var} – celkové variabilní náklady na výrobu protlačováním [Kč]

- Celkové fixní náklady:

Jedna nástrojová sada stojí 100 000 Kč, jejíž životnost je 40 000 ks a jsou prováděny tři operace, fixní náklady jsou tedy:

$$N_{fix} = \frac{N_{nás} \cdot n_{op} \cdot n_r}{n_{\check{z}}} = \frac{100\,000 \cdot 3 \cdot 200\,000}{40\,000} = 1\,500\,000 \text{ Kč} \quad (4.11)$$

kde: N_{fix} – fixní náklady na celou sérii [Kč]

$N_{nás}$ – cena nástrojové sady [Kč]

n_{op} – počet operací [ks]

$n_{\check{z}}$ – životnost nástrojové sady [ks]

- Celkové náklady na výrobu série:

$$N_{celk} = N_{var} + N_{fix} = 16\,233\,870 + 1\,500\,000 = 17\,733\,870 \text{ Kč} \quad (4.12)$$

kde: N_{celk} – celkové náklady na výrobu [Kč]

Náklady na jeden kus:

$$N_{ks} = \frac{N_{celk}}{n_r} = \frac{17\,733\,870}{200\,000} = 88,7 \text{ Kč} \quad (4.13)$$

kde: N_{ks} – náklady na jeden kus, vyráběný protlačováním [Kč]
 Náklady na jeden kus, vyráběný protlačováním jsou 88,7 Kč.

Prodejní cena jednoho kusu při 30% marži:

$$C_{\text{prod}} = 1,3 \cdot N_{ks} = 1,3 \cdot 88,7 = 115,3 \text{ Kč} \quad (4.14)$$

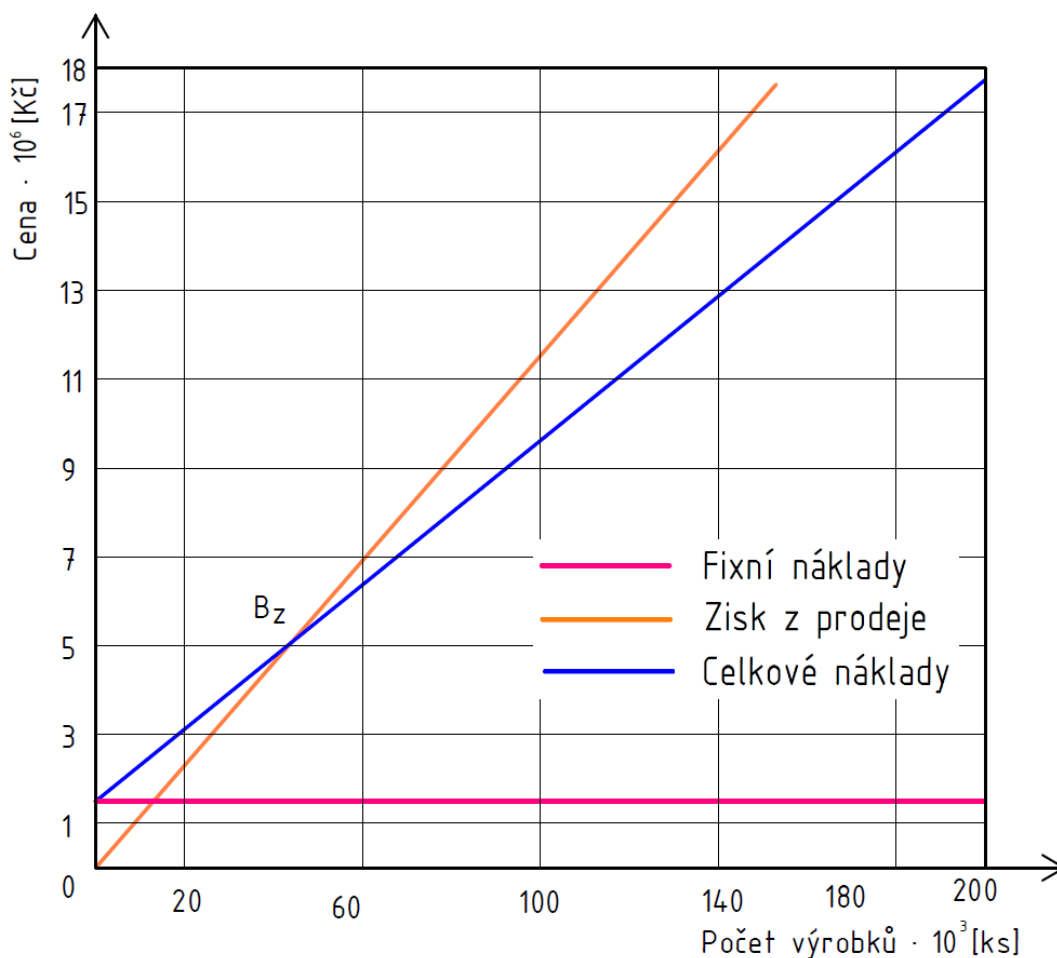
kde: C_{prod} – prodejní cena jednoho kusu [Kč]

- Bod zvratu se určí dle následujícího vztahu:

$$B_z = \frac{N_{\text{fix}}}{C_{\text{prod}} - \frac{N_{\text{var}}}{n_r}} = \frac{1\,500\,000}{115,3 - \frac{16\,233\,870}{200\,000}} = 43\,948,76 \text{ ks} \quad (4.15)$$

kde: B_z – bod zvratu [ks]

Z výpočtu plyne, že je nutné vyrobit 43 949 ks, aby série začala generovat zisk při marži 30 % na jednom dílci. Ve skutečnosti by toto číslo bylo vyšší, protože byla zanedbána část vstupních nákladů. Výsledky jsou graficky zpracovány na obrázku 47.



Obr. 47 Grafické zpracování ekonomického zhodnocení [vl. tvorba]

5 ZÁVĚRY

Řešenou součástí je čep, který je součástí řízení osobního automobilu. Tyto díly jsou značně namáhané, jsou tedy přísne nároky na houževnatost a mechanické vlastnosti. Z těchto důvodů byl zvolen materiál 27MnCrB7-2 – jedná se o nízkolegovanou konstrukční ocel, určenou k zušlechťování. Z variantního řešení vhodných technologií byla jako nejvýhodnější zvolena technologie protlačování.

Jako polotovár byl zvolen špalík o průměru 57 mm a délce 135 mm. Byl zvolen podle největšího průměru výrobku, protože odpadá operace kalibrování a je možné ušetřit na nástrojích. Tento rozměr není v normě, ale tyče jsou odebírány v dostatečně velkém množství, nejen pro tuto konkrétní součást, ale i pro další díly podobného typu. Pro dodavatele tedy není problém tyč o daném rozměru vyrobit a dodat. Tyto tyče budou děleny na kotoučové pile a následně tepelně zpracovány a povrchově upraveny fosfátováním, kde se do vzniklé vrstvy aplikuje mazivo na bázi molyka.

Technologický postup bylo nutné rozdělit do tří operací a ty následně do dvou tvářecích kroků, protože po druhé operaci byly dle výpočtů vyčerpány plastické vlastnosti a mohlo by dojít k porušování materiálu. Pro obnovu tvárných vlastností bylo zvoleno před první a třetí operací rekrystalizační žíhání, po kterém byla vždy provedena povrchová úprava.

Navržený postup byl ověřen v simulačním programu Deform-2D, během kterého bylo zjištěno, že je potřeba navržené nástroje upravit tak, aby nedocházelo k porušování materiálu a aby nebyly porušeny příslušné rozměrové tolerance. Tímto způsobem byl navržen ideální technologický postup a optimální rozměry nástrojů. První tvářecí krok bude realizován na postupovém hydraulickém automatu Schöler p200, druhý krok (kalibrace) bude provedena samostatně na klikovém lisu Krupp p63.

Při takto navrženém postupu byly celkové náklady stanoveny na 17 733 870 Kč, což odpovídá nákladům 88,7 Kč na jeden díl. Výroba se stane při 30% marži ziskovou po překročení hranice 43 949 vyrobených kusů, což je necelá čtvrtina roční série. Při stanovení těchto čísel však nebylo zohledněno několik faktorů, jako jsou režie, mzdy, energie a další náklady, takže výsledné číslo se může v praxi lišit.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [26]

1. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. : il. ISBN 80-214-2374-9.
2. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 169 s. : obr., tabulky, grafy. ISBN 978-80-214-4747-9.
3. BABOR, Karel, Augustin CVILINEK a Jan FIALA. *Objemové tváření oceli*. 1.vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1967. 332 s. ISBN 04-239-67.
4. FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 167 s. ISBN 80-214-2764-7.
5. FELDMAN, Heinz D. *Protlačování oceli*. Praha: SNTL, 1962, 196 s.
6. NOVOTNÝ, Karel a Zdeněk MACHÁČEK. *Speciální technologie I. Plošné a objemové tváření*. Vyd. 2. Brno: VUT, 1992, 171 s. : il. ISBN 80-214-0404-3.
7. American Axle & Manufacturing. *American Axle & Manufacturing* [online]. Detroit: AAM, 2019 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://www.aam.com/>
8. Material specification sheet Saerstahl - 27MnCrB5-2. *Saerstahl* [online]. Neunkirchen: Saerstahl, 2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.saerstahl.com/sag/downloads/download/13078>
9. Obr. 4 – [Odlévání]. In: *Fundi inox* [online]. Madrid: Albatros, 2018 [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <http://fundiinox.com/es/wp-content/uploads/2016/10/FUNDICION-DE-ALUMINIO.jpg>
10. Obr. 5 – [Soustružení]. In: Finish turning. In: *Custom Industrial Processing* [online]. St. Marys: CIP, 2019 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <http://www.ciprocessing.com/images/content/Finish-Turning-4.jpg>
11. Obr. 6 – [Zápustkové kování]. In: Hot forging. In: *Baldan forge* [online]. Arsiero: Baldan forge, 2019 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://www.baldanforge.com/attachment/img/3aw5s5g0.jpg>
12. HOSFORD, William F. Annealing. *Iron and Steel*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012, s. 51-65. DOI: 10.1017/CBO9781139086233.007. ISBN 9781139086233.
13. MÍŠEK, Bohumil a Jan HRSTKA. *Strojírenské materiály a povrchové úpravy: koroze a povrchová úprava kovů*. Vydání 2. nezměněné. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1982, 208 s.
14. JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka*. 4. vyd. přeprac. A dopln. Praha: SNTL, 1983, 391 s.

15. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu. I. 2. opr. a rozš. vyd.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, xii, 516 s. : il. ISBN 80-7204-283-1.
16. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2., opr. a rozš. vyd.* Brno: CERM, 2002, 392 s. : il. ISBN 80-7204-248-3.
17. HAUSEROVÁ, Daniela. Effect of Heating Rate on Accelerated Carbide Spheroidisation (ASR) in 100CrMnSi6-4 Bearing Steel. *Nanostal*[online]. Varšava: Nanostal, 2018 [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://nanostal.eu/konferencje/ms2014/list-of-papers>
18. Obr. 17 – [*Fosfátová vrstva pod elektronovým mikroskopem (100 x zvětšeno)*]. In: *Science direct* [online]. Bilbao: Science direct, 2017 [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: https://ars-els-cdn-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/content/image/1-s2.0-S0257897217303195-gr5_lrg.jpg
19. Ceník výkupu kovů. *Barko* [online]. Zastávka u Brna: Barko, 2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.druhotnesuroviny.cz/cenik.htm>
20. Obr. 46 – [Hydraulický lis Schüller]. In: VALIŠ, Ondřej. *Výroba pastorku*. Brno, 2017. 39 s, 1 výkres, 1 příloha, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Michaela Císařová, Ph.D.
21. AUTODESK. *Inventor*, [počítačový program], Verze: 2019. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/inventor/overview>.
22. DEFORM. *Deform-2D*, [počítačový program], Verze: 8.1, Dostupné z: <https://www.deform.com/products/deformd/>
23. Příloha č. 1 – [Vhodné oceli pro objemové tváření za studena]. In: DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 169 s. : obr., tabulky, grafy. ISBN 978-80-214-4747-9.
24. Příloha č. 2 – [Parametry průtlačnic a průtlačníků]. In: FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. : il. ISBN 80-214-2374-9.
25. Příloha č. 3 – [Parametry zděřovaných průtlačnic]. In: FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. : il. ISBN 80-214-2374-9.
26. CITACE PRO. Generátor citací [online]. 2013 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Význam	Jednotka
a	poměrný poloměr	[-]
A ₁	práce při první operaci	[J]
A ₂	práce při druhé operaci	[J]
A ₃	celková práce při třetí operaci	[J]
A _{3d}	práce při třetí operaci (dřík)	[J]
A _{3h}	práce při třetí operaci (hlava)	[J]
B _z	bod zvratu	[ks]
C _{1kg}	cena za 1 kg vratného kovu	[Kč · kg ⁻¹]
C _{kg}	cena za 1 kg materiálu	[Kč · kg ⁻¹]
C _{odp}	cena za vratný kov	[Kč]
C _{prod}	prodejní cena jednoho kusu	[Kč]
C _{pů}	cena povrchové úpravy	[Kč · ks ⁻¹]
C _{rž}	cena žihání jednoho kusu	[Kč · ks ⁻¹]
d	průměr otvoru v součásti	[mm]
D ₀	průměr polotovaru	[mm]
D ₀₁	průměr D ₀ po první tvářecí operaci	[mm]
D ₀₂	průměr D ₀ po druhé tvářecí operaci	[mm]
d ₁	průměr otvoru 1	[mm]
D ₂	průměr dříku 2	[mm]
d ₂	průměr otvoru 2	[mm]
D ₂₂	průměr dříku 2 po 2. operaci	[mm]
D ₃	průměr dříku 3	[mm]
D _{z2}	vnitřní průměr první zděře	[mm]
D _{z3}	vnitřní průměr druhé zděře	[mm]
D _{z4}	vnější průměr druhé zděře	[mm]
f ₁	koeficient tření v zásobníku	[-]
F ₁	síla pro první operaci	[kN]
F ₁₂	celková tvářecí síla v prvních dvou operacích	[kN]
f ₂	koeficient tření v kuželové části	[-]
F ₂	síla pro druhou operaci	[kN]
F ₃	síla pro třetí operaci	[kN]
F _{c1}	síla pro dimenzování lisu pro první tvářecí krok	[kN]
F _{c2}	síla pro dimenzování lisu pro druhý tvářecí krok	[kN]
H	hloubka vtlačovaného otvoru	[mm]
k	koeficient bezpečnosti	[-]
L ₀	délka polotovaru	[mm]
L ₁	výška polotovaru v zásobníku	[mm]
L ₃	výška kalibračního oka	[mm]
l _{nt}	délka nevyužitého konce tyče	[mm]
l _p	délka polotovaru	[mm]
l _t	délka tyče	[mm]
m _{1t}	hmotnost jedné tyče	[kg]
m _{odp}	hmotnost odpadu	[kg]
m _t	hmotnost všech tyčí	[kg]

N_{celk}	celkové náklady na výrobu	[Kč]
N_{fix}	fixní náklady na celou sérii	[Kč]
N_{ks}	náklady na jeden kus, vyráběný protlačováním	[Kč]
$N_{\text{nás}}$	cena nástrojové sady	[Kč]
n_{op}	počet operací	[ks]
n_p	počet přířezů z jedné tyče	[ks]
$N_{\text{pú}}$	náklady na povrchovou úpravu	[Kč]
$n_{\text{pú}}$	počet operací povrchové úpravy	[ks]
n_r	velikost série	[ks]
$N_{\text{rž}}$	náklady na rekrystalizační žíhání	[Kč]
n_t	celkový počet tyčí	[ks]
N_{var}	celkové variabilní náklady na výrobu protlačováním	[Kč]
N_{vs}	náklady na vstupní materiál	[Kč]
$n_{\text{ž}}$	počet žíhacích operací	[ks]
$n_{\text{živ}}$	životnost nástrojové sady	[ks]
r_1	vnitřní poloměr průtlačnice	[mm]
r_2	vnější poloměr průtlačnice	[mm]
S_{p1}	činná plocha průtlačníku v první operaci	[mm ²]
S_{p2}	činná plocha průtlačníku ve druhé operaci	[mm ²]
S_{p3}	činná plocha průtlačníku ve třetí operaci	[mm ²]
\dot{s}_k	šířka řezného kotouče	[mm]
V	objem součásti	[mm ³]

α	úhel kuželové části	[rad]
Δd_1	lisovací přesah pro první objímku	[mm]
Δd_{1o}	lisovací přesah pro první objímku	[mm]
Δd_{2o}	lisovací přesah pro druhou objímku	[mm]
ε_1	poměrné přetvoření v první operaci	[-]
ε_2	poměrné přetvoření ve druhé operaci	[-]
ε_{3d}	poměrné přetvoření ve třetí operaci (dřík)	[-]
ε_{3h}	poměrné přetvoření ve třetí operaci (hlava)	[-]
ρ_{ocel}	hustota oceli	[kg · m ⁻³]
σ_{d1}	deformační odpor v první operaci	[MPa]
σ_{d2}	deformační odpor ve druhé operaci	[MPa]
σ_{d3}	deformační odpor ve třetí operaci	[MPa]
σ_{dF}	deformační odpor dle Feldmanna	[MPa]
σ_{dS}	deformační odpor dle Siebela	[MPa]
σ_{ef}	efektivní napětí	[MPa]
σ_p	přirozený přetvárný odpor	[MPa]
σ_{P1}	přirozený přetvárný odpor v zásobníku	[MPa]
σ_{PS}	střední hodnota přirozeného přetvárného odporu	[MPa]
σ_{r1}	radiální napětí v první operaci	[MPa]
σ_{r2}	radiální napětí ve druhé operaci	[MPa]
σ_{r3}	radiální napětí ve třetí operaci	[MPa]
φ_1	skutečné přetvoření v první operaci	[-]
φ_2	skutečné přetvoření ve druhé operaci	[-]
φ_{3d}	skutečné přetvoření ve třetí operaci (dřík)	[-]
φ_{3h}	skutečné přetvoření ve třetí operaci (hlava)	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady výrobků vyráběných protlačováním [7]	9
Obr. 2 3D model čepu [vl. tvorba]	10
Obr. 3 Náčrt čepu [vl. tvorba]	10
Obr. 4 Odlévání [9]	11
Obr. 5 Soustružení [10]	11
Obr. 6 Zápustkové kování [11]	12
Obr. 7 Protlačování [vl. tvorba]	12
Obr. 8 Změny mechanických vlastností [2]	13
Obr. 9 Závislost poměrného deformačního odporu na úhlu α [3]	14
Obr. 10 Schéma dopředného protlačování [1]	14
Obr. 11 Schéma zpětného protlačování [1]	15
Obr. 12 Graf závislosti deformačního odporu na teplotě [4]	15
Obr. 13 Struktura perlitu pod elektronovým mikroskopem (15 000 x zvětšeno) [17]	17
Obr. 14 Závislost teploty žhánání na čase [12]	17
Obr. 15 Závislost teploty žhánání na poměrné deformaci [5]	18
Obr. 16 Závislost doby moření na koncentraci kyseliny sírové [13]	18
Obr. 17 Fosfátová vrstva pod elektronovým mikroskopem (100 x zvětšeno) [18]	19
Obr. 18 Polotovary opatřeny vrstvou maziva na bázi MoS ₂ [vl. tvorba]	19
Obr. 19 Schéma protlačovacího nástroje pro kalíškování [3]	20
Obr. 20 Průtlačníky pro dopředné protlačování [1]	21
Obr. 21 Graf závislosti deformačního odporu na poměrné deformaci [1]	21
Obr. 22 Schéma složené průtlačnice pro dopředné protlačování [1]	22
Obr. 23 Schéma zděrované průtlačnice pro zpětné protlačování [1]	22
Obr. 24 Klikový lis Weingarten [vl. tvorba]	23
Obr. 25 Hydraulický lis Eitel [vl. tvorba]	23
Obr. 26 Příklady kalíškových a čepových součástí [3]	24
Obr. 27 Příklady nepravidelných součástí [3]	24
Obr. 29 Odstupňování čepu usnadní výrobu [3]	24
Obr. 28 Podmínka pro vtlačování otvorů [vl. tvorba]	24
Obr. 30 Schéma čepu s popiskem [vl. tvorba]	25
Obr. 31 Detail otvorů [vl. tvorba]	25
Obr. 32 Schéma první tvářecí operace [vl. tvorba]	26
Obr. 33 Simulace první operace [vl. tvorba]	26
Obr. 35 Simulace druhé operace [vl. tvorba]	27
Obr. 34 Schéma druhé tvářecí operace [vl. tvorba]	27
Obr. 36 Schéma třetí tvářecí operace [vl. tvorba]	28
Obr. 37 Simulace třetí operace [vl. tvorba]	28
Obr. 38 Detail kritického místa [vl. tvorba]	28
Obr. 39 Průběh síly během první operace [vl. tvorba]	29
Obr. 40 Průběh síly během druhé operace [vl. tvorba]	30
Obr. 41 Průběh síly ve třetí operaci [vl. tvorba]	31
Obr. 42 Schéma nástrojů pro první operaci [vl. tvorba]	32
Obr. 43 Schéma nástrojů pro druhou operaci [vl. tvorba]	33
Obr. 44 Zděrovaná průtlačnice [vl. tvorba]	34
Obr. 45 Schéma nástrojů pro třetí operaci [vl. tvorba]	35
Obr. 46 Hydraulický lis Schöler p200 [20]	36
Obr. 47 Grafické zpracování ekonomického zhodnocení [vl. tvorba]	39

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Chemické složení oceli 27MnCrB7-2 dle DIN EN 10083 [15]

Tabulka 2 Mechanické vlastnosti oceli 27MnCrB7-2 [15]

Tabulka 3 Maximální dovolené redukce při protlačování [3]

Tabulka 4 Technické parametry lisů

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Vhodné oceli pro tváření za studena [23]

Příloha 2 Parametry průtlačnic a průtlačníků [24]

Příloha 3 Parametry zděrovaných průtlačnic [25]

SEZNAM VÝKRESŮ

Výkres součásti

2019-BP-193225-01

Výkres sestavy pro 1. a 2. operaci

2019-BP-193225-S1

Výkres sestavy pro 3. operaci

2019-BP-193225-S2

Výkres průtlačnice pro 3. operaci

2019-BP-193225-02

Výkres průtlačníku pro 3. operaci

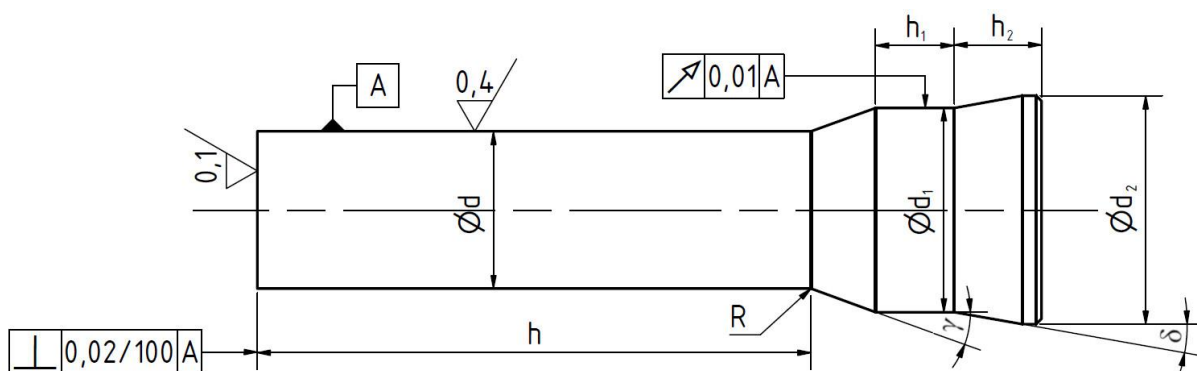
2019-BP-193225-03

Oceli dle ČSN		Chemické složení [%]									
		C	Mn	Si	Cr	V	Ni	Cu	P	S	P-S
A	11 341	0,10							0,05	0,05	
	11 426	0,15							0,05	0,05	
	11 523	0,20	1,50	0,55					0,05	0,05	
B	12 013	0,07	0,30						0,03	0,03	0,05
	12 010	0,13	0,60	0,35					0,04	0,04	0,07
	12 020	0,20	0,90	0,35					0,04	0,04	0,07
	12 024	0,25	0,65	0,37	0,30		0,30		0,05	0,05	0,09
	12 031	0,35	0,80	0,37	0,30		0,30		0,045	0,045	
	12 040	0,40	0,80	0,35					0,04	0,04	0,07
	12 050	0,50	0,80	0,35					0,04	0,04	0,07
C	13 240	0,40	1,40	1,40					0,04	0,04	
	14 120	0,18	0,60	0,35	0,90				0,04	0,04	0,07
	14 220	0,19	1,40	0,35	1,10				0,04	0,04	0,07
	14 221	0,22	1,30	0,35	1,30				0,04	0,04	0,07
	14 331	0,35	1,10	1,20	1,10		0,40	0,25	0,035	0,035	
	15 230	0,34	0,80	0,40	2,50	0,20			0,04	0,04	0,07
	15 260	0,55	1,00	0,40	1,20	0,20			0,04	0,04	0,07
	16 220	0,19	1,00	0,25	1,20	0,15	1,60		0,04	0,04	0,07

A – oceli nelegované

B – oceli ušlechtilé

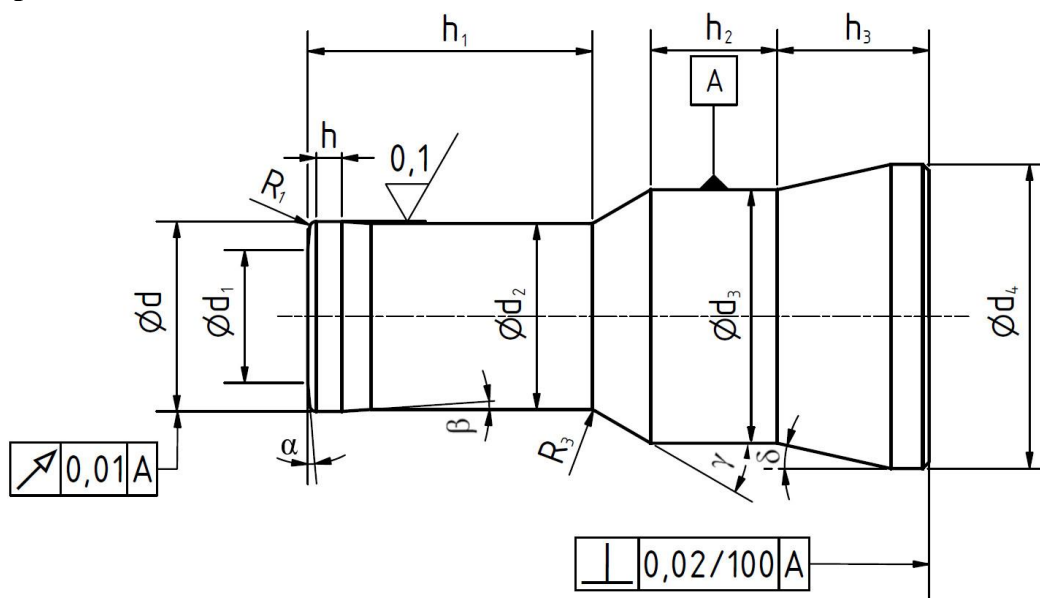
C – oceli ušlechtilé nízkolegované

Parametry průtlačník dopředné

Konkrétní rozměry se určí dle následujících vztahů:

$$\begin{aligned}
 d_1 &\doteq 1,3 \cdot d & [\text{mm}] & & h_2 &\geq 0,5 \cdot d_2 & [\text{mm}] \\
 d_2 &\doteq 1,6 \cdot d & [\text{mm}] & & R &= d & [\text{mm}] \\
 h &\leq 3 \cdot d & [\text{mm}] & & \gamma &= (15 - 30) & [^\circ] \\
 h_1 &= 0,5 \cdot d_1 & [\text{mm}] & & \delta &= (5 - 15) & [^\circ]
 \end{aligned}$$

kde: d – průměr polotovaru [mm]

Zpětné

Konkrétní rozměry se určí dle následujících vztahů:

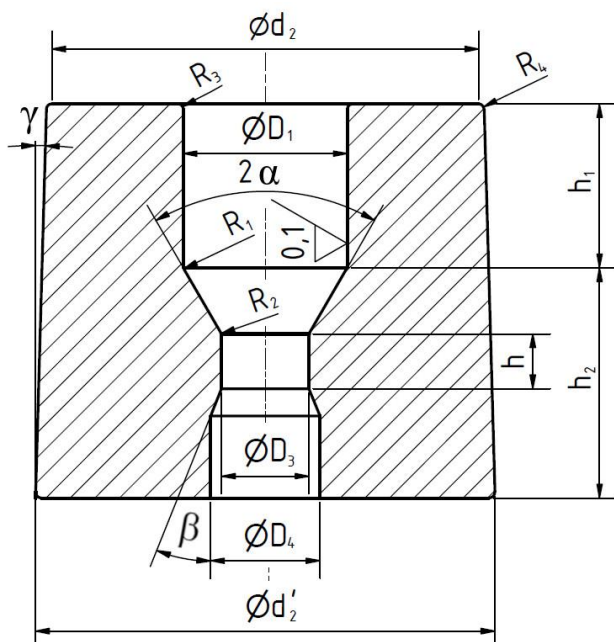
$$\begin{aligned}
 d_1 &\doteq 0,7 \cdot d & [\text{mm}] & & h &= 0,5 \cdot \sqrt{d} & [\text{mm}] \\
 d_2 &= d - (0,1 - 0,2) & [\text{mm}] & & R_1 &= (0,05 - 0,1) \cdot d & [\text{mm}] \\
 d_3 &\doteq 1,3 \cdot d & [\text{mm}] & & R_3 &= d & [\text{mm}] \\
 d_4 &\doteq 1,6 \cdot d & [\text{mm}] & & \alpha &= (5 - 8) & [^\circ] \\
 h_1 &\leq 3 \cdot d & [\text{mm}] & & \beta &= (4 - 5) & [^\circ] \\
 h_2 &\doteq 0,5 \cdot d_3 & [\text{mm}] & & \gamma &= (15 - 30) & [^\circ] \\
 h_3 &\geq 0,5 \cdot d_4 & [\text{mm}] & & \delta &= (5 - 15) & [^\circ]
 \end{aligned}$$

kde: d – průměr otvoru v průtlačku [mm]

h – výška fazetky [mm]

PRŮTLAČNICE – pro dopředné protlačování:

Konkrétní rozměry se určí dle následujících vztahů:



$$D_4 = D_3 + (0,1 - 0,2) \quad [\text{mm}]$$

$$h = 0,5 \cdot \sqrt{D_3} \quad [\text{mm}]$$

$$h_2 = \min. 0,7 \cdot D_1 \quad [\text{mm}]$$

$$R_1 = 0,5 \cdot (D_1 - D_3) \quad [\text{mm}]$$

$$R_2 = (0,05 - 0,1) \cdot D_3 \quad [\text{mm}]$$

$$R_3 = 0,15 \cdot D_1 \quad [\text{mm}]$$

$$\gamma = (1 - 2)^\circ \quad [^\circ]$$

$$\beta = (5 - 10)^\circ \quad [^\circ]$$

kde: D_1 – průměr polotovaru [mm] D_3 – průměr protlačku [mm] h – výška kalibračního oka [mm] h_1 – výška zásobníku [mm]

– volí se podle výšky polotovaru, aby nedošlo k jeho pěchování či vzpěru.
Rozměry d_2 a d_2' se určí na základě radiálního tlaku a počtu použitých zděří.

Pro zpětné protlačování:

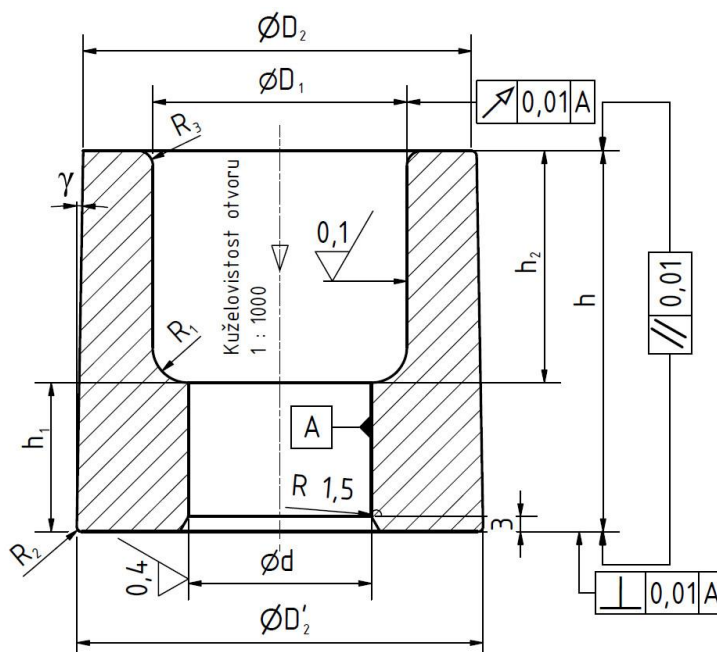
Konkrétní rozměry jsou určeny dle následujících vztahů:

$$R_2 = (0,5 - 1,0) \quad [\text{mm}]$$

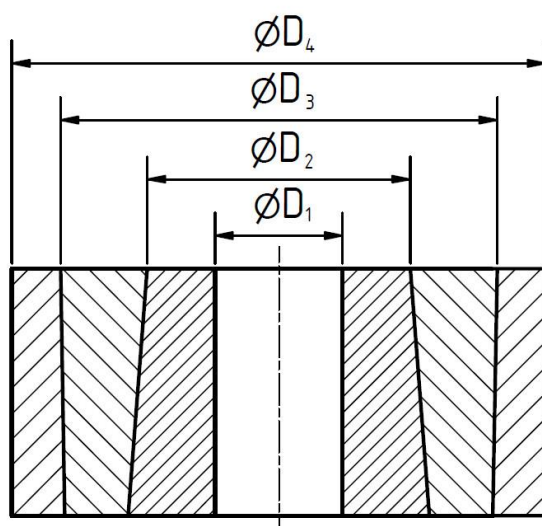
$$R_3 = 0,15 \cdot d \quad [\text{mm}]$$

$$h_1 = 0,9 \cdot d \quad [\text{mm}]$$

$$\gamma = (1 - 3)^\circ \quad [^\circ]$$

Kde: d – průměr vyhazovače [mm] D_1 – průměr polotovaru [mm]

	PRŮTLAČNICE	
	S jednou zděří	Se dvěma zděřemi
Radiální tlak [MPa]	1 000 – 1 600	1 600 – 2 000
Poměrné průměry	$D_2 / D_1 = (2 - 2,2)$	$D_2 / D_1 = (1,6 - 1,8)$
	$D_3 / D_2 = (2 - 2,3)$	$D_3 / D_1 = (2,2 - 3,2)$
	$D_3 / D_1 = (4 - 5,5)$	$D_4 / D_1 = (4,0 - 6,0)$
Stykový průměr	$D_2 = \sqrt{D_1 \cdot D_3}$	-
Přesah [mm] D_2	$(0,0055 - 0,0075) \cdot D_2$	$(0,004 - 0,005) \cdot D_2$
[mm] D_3		$(0,003 - 0,004) \cdot D_3$



Obr. 1 Schéma průtlačnice se dvěma objímkami